N° d'enregistrement
au C.N.R.S.
A.O. 1044

ARTICLE PRINCIPAL

RECOUVRANT EN PARTIE

LA THÈSE DE DOCTORAT ÈS-SCIENCES APPLIQUÉES

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

PAR

Michel GINAT

POUR OBTENIR

Le Grade de Docteur Ès-Sciences

Sujet de la Thèse

CONTRIBUTION A LA CONSTRUCTION DU TÉLESCOPE A DEUX MIROIRS DE NANÇAY

Soutenue le 22 juin 1966, devant la Commission d'examen

MM. J. ROSCH — Président

J. LEQUEUX, J. COMMIOT — Examinateurs

N° d'enregistrement
au C.N.R.S.
A.O. 1044

ARTICLE PRINCIPAL

RECOUVRANT EN PARTIE

LA THÈSE DE DOCTORAT ÈS-SCIENCES APPLIQUÉES

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

PAR

Michel GINAT

POUR OBTENIR

Le Grade de Docteur Ès-Sciences

Sujet de la Thèse

CONTRIBUTION A LA CONSTRUCTION DU TÉLESCOPE A DEUX MIROIRS DE NANÇAY

Soutenue le 22 juin 1966, devant la Commission d'examen

MM. J. ROSCH — Président
J. LEQUEUX, J. COMMIOT — Examinateurs

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

LE GRAND RADIOTÉLESCOPE A DEUX MIROIRS DE NANCAY
ÉTUDE DE LA STRUCTURE

M. GINAT

Le présent article représente la première partie du mémoire présenté le 22 juin 1966 à la Faculté des Sciences de Paris pour l'obtention du titre de Docteur ès Sciences Appliquées (n° d'identification aux archives du Centre de Documentation du C.N.R.S. : A.O. 1044).

PRESENTATION DE L'INSTRUMENT

Le grand radiotélescope à deux miroirs de Nançay est construit suivant un principe assez voisin de celui édifié par J.D. KRAUS à l'Université d'Ohio. C'est un instrument méridien dont la partie principale est constituée par un miroir concave fixe ayant son axe principal dirigé vers le Nord et sensiblement horizontal. Un miroir plan lui fait face, mobile autour d'un axe horizontal et orienté Est-Ouest (bibl. 1).

L'inclinaison du miroir plan est réglée de manière qu'il renvoie le rayonnement radioélectrique de l'objet étudié (à sa culmination supérieure), dans la direction de l'axe principal du miroir concave. Ce dernier concentre les ondes en direction d'antennes réceptrices (permettant des observations sur différentes fréquences) placées à son foyer, au voisinage du sol (figure 1).

Ce dispositif a, en principe, une grande simplicité, car la surface du réflecteur concave est fixe. Une fois la forme et les tolérances de surface définies, on peut admettre que les réglages sont faits une fois pour toutes.

La partie mobile de l'instrument est plane, et peut être aisément fractionnée en un certain nombre d'éléments juxtaposés et alignés optiquement. De plus il est plus facile de vérifier, au cours de son mouvement, la stabilité d'un plan que celle d'une surface à double courbure. Enfin il est très aisé de permuter les antennes réceptrices, puisqu'elles sont au niveau du sol.

Le coût de l'instrument est donc peu élevé, mais ses performances se limitent à l'observation méridienne dans le cas d'un miroir paraboloïdal. Pour pallier cet inconvénient, nous avons choisi un miroir concave sphérique. De cette manière, nous avons pu étendre le champ à environ une demi-heure de part et d'autre de l'heure de passage au méridien local, en déplaçant l'antenne de manière qu'elle suive le déplacement de l'image de l'astre sur la sphère focale. Les possibilités d'un tel fonctionnement ont été prévues théoriquement par les calculs de J. ARSAC (bibl. 2).

Les caractéristiques ont fait l'objet de nombreuses discussions au sein de l'équipe de Radioastronomie et avec le constructeur. Les dimensions déterminées tiennent compte à la fois de considérations budgétaires et des difficultés de réalisation ; elles nous semblent constituer un excellent compromis permettant de doter l'astronomie française d'un très grand instrument.

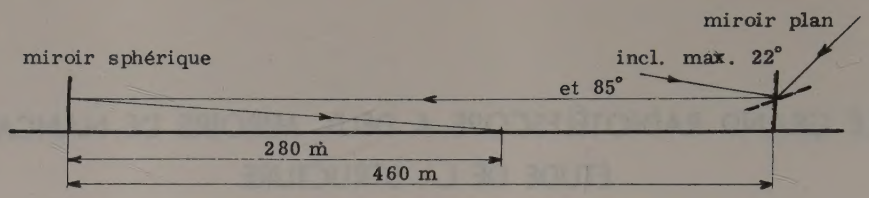


Figure I - Schéma de principe : trajet des rayons (vue en élévation).

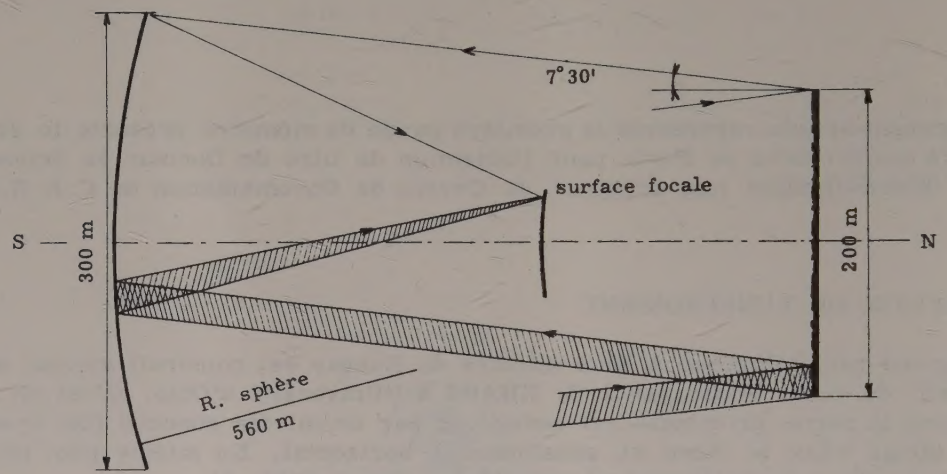


Figure II - Schéma de principe : trajet des rayons (vue en plan).

Les caractéristiques principales lors du début des travaux étaient :

- miroir sphérique :
  - rayon de la sphère 560 mètres
  - dimensions dans le plan horizontal : 300 mètres de longueur développée.
  - dimensions dans le plan vertical : 35 mètres de longueur développée.
- miroir plan :
  - longueur 200 mètres
  - hauteur 40 mètres
  - précision du pointage ± 1'

tolérances de surface générales :

- ± 1 cm d'écart aux surfaces théoriques dans la partie centrale
- ± 2 cm sur les bords

Longueur développée du chemin de roulement sur lequel se déplacent les antennes focales : 100 mètres (soit 7°5 de part et d'autre du méridien (figure 2)).

Le choix d'un miroir sphérique, s'il augmente le champ, diminue le rendement dans l'axe par rapport à un miroir parabolique (solution J.D. KRAUS) de même ouverture.

Un compromis a été fait entre la diminution relative de rendement et les défauts géométriques (coma, courbure de champ) résultant de la position du miroir plan, jouant le rôle de diaphragme, par rapport au centre de la sphère. Il a donc été décidé (J. ARSAC) de placer le miroir plan entre le centre et le foyer du miroir concave, la distance entre miroirs plan et sphérique est de 460 mètres. L'ouverture du miroir dans le plan horizontal étant très grande, l'instrument est entaché d'aberration de sphéricité. Une correction de SCHMIDT, modifiant le trajet optique des rayons marginaux, a été introduite en déformant légèrement sur les bords, la surface du miroir plan. Les calculs détaillés ont été effectués par F. BIRAUD (bibl. 3).

Il faut noter que dans la période qui a immédiatement précédé le début des travaux, de nouvelles spécifications concernant les tolérances de la surface réfléchissante ont été introduites. Devant le très grand intérêt présenté par l'utilisation de l'instrument à des longueurs d'onde inférieures à 21 cm, le constructeur, sollicité par les responsables du projet à l'Observatoire, s'est porté garant des possibilités de la structure du miroir.

Il a donc été décidé :

1/ de diviser par deux les dimensions de la maille élémentaire du treillis réflecteur.

2/ d'améliorer le réglage de la structure en fixant les tolérances de la surface réfléchissante à :

± 0,5 cm pour la partie centrale

± 1 cm sur les bords

la précision du pointage restant la même que précédemment.

L'ensemble de l'instrument est implanté dans la partie Sud-Est du terrain de la Station de Radioastronomie de Nançay.

Pour des raisons budgétaires aussi bien qu'astronomiques (l'Observatoire voulait se réserver la possibilité de contrôler si un projet de cette envergure était viable), l'instrument a été construit en deux phases de travaux :

1/ De 1958 à 1960, le cinquième de la surface totale a été réalisé, soit :

- miroir sphérique : 60 mètres de longueur développée
- miroir plan : 40 mètres de longueur.

Une période d'environ 18 mois a suivi cette construction : elle a été consacrée à des études astronomiques, ainsi qu'à une exploration systématique des possibilités de la structure et de son comportement.

2/ De 1962 à 1964, l'extension aux dimensions définitives a été exécutée.

BRÈVE DESCRIPTION DES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS CONSTITUANT L'INSTRUMENT

MIROIR SPHERIQUE

L'ossature du miroir est constituée par une série de 31 pylônes de 35 mètres de hauteur, espacés de 10 mètres d'axe en axe (sur la face intérieure) et disposés radialement. Des poutres horizontales à treillis de 10 mètres de portée les entretoisent à des niveaux espacés de 5,50 mètres et reçoivent un empennage de nervures verticales (montants secondaires) espacées de 2,50 mètres. Il existe donc 3 montants secondaires entre deux montants principaux consécutifs. Toutes les membrures verticales sont cintrées au rayon de 560 mètres. Sur cette ossature sont tendus tous les 0,8 mètres des câbles horizontaux destinés à supporter les lés verticaux du treillis constituant la surface réfléchissante proprement dite.

Un ensemble de contreventements et de barres de raidissement complète le miroir, qui est divisé en trois parties de 100 mètres de longueur développée pour tenir compte du jeu de dilatation-contraction nécessaire.

Le poids total de la charpente du miroir sphérique est de 750 tonnes. Chaque montant principal pèse 17 tonnes.

La surface réalisée est telle que :

- son intersection avec un plan diamétral vertical soit un arc de cercle de 560 mètres de rayon.

- son intersection avec un plan horizontal, qui est définie par les câbles tendus entre les différents montants successifs, soit une ligne polygonale à 120 côtés de 2,50 mètres de longueur.

Les écarts à la sphère théorique de la surface ainsi définie sont au maximum de 1,5 mm. Des dispositifs de réglage sont prévus à chaque point de passage des câbles horizontaux sur les montants principaux et secondaires (figures 3 et 4).

MIROIR PLAN

Il se compose de dix panneaux juxtaposés de 40 mètres de hauteur par 20 mètres de longueur, orientés face au Sud.

Chaque élément tourne de 90° autour d'un axe horizontal et orienté Est-Ouest à 21 mètres au-dessus du sol. La position horizontale qui correspond à une surface apparente (vue du miroir sphérique) nulle est une position de repos. La zone utile d'exploitation du miroir plan est comprise entre 30° d'inclinaison (soit approximativement une visée à 76° de déclinaison) et 90° d'inclinaison (soit -44° de déclinaison).

Pour donner à la structure d'un panneau élémentaire la rigidité convenable sur 20 mètres de porte-à-faux de part et d'autre de l'axe de rotation, le constructeur a donné à la charpente la forme d'une demi-roue de grand diamètre portant le dispositif d'entraînement. L'axe est constitué par une poutre réalisée en caisson (nécessité d'obtenir une grande rigidité dans le plan vertical de symétrie). Il est relié par des poutres radiales à une jante en demi-cercle, centrée sur l'axe, laquelle supporte le tambour d'entraînement.

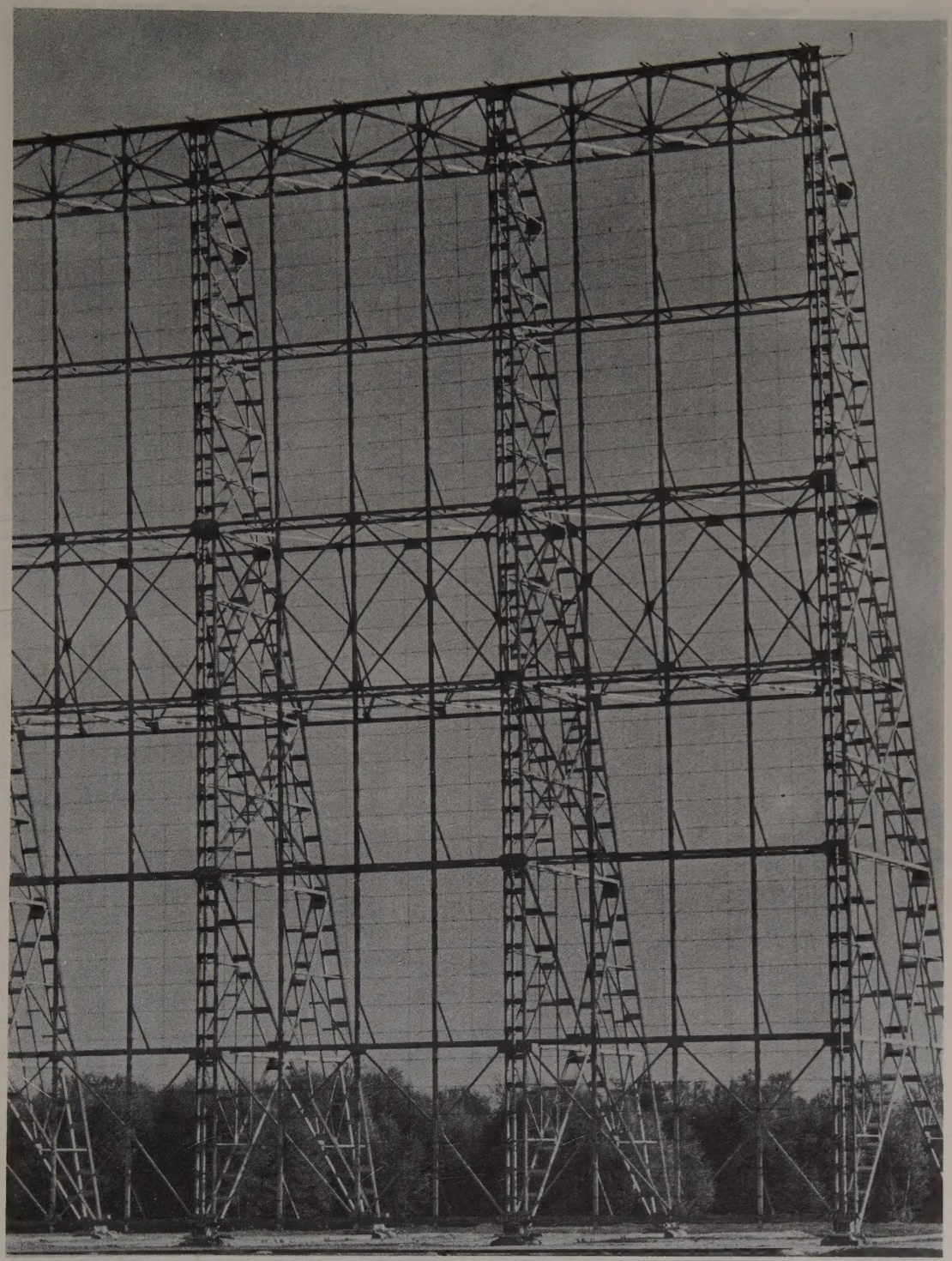
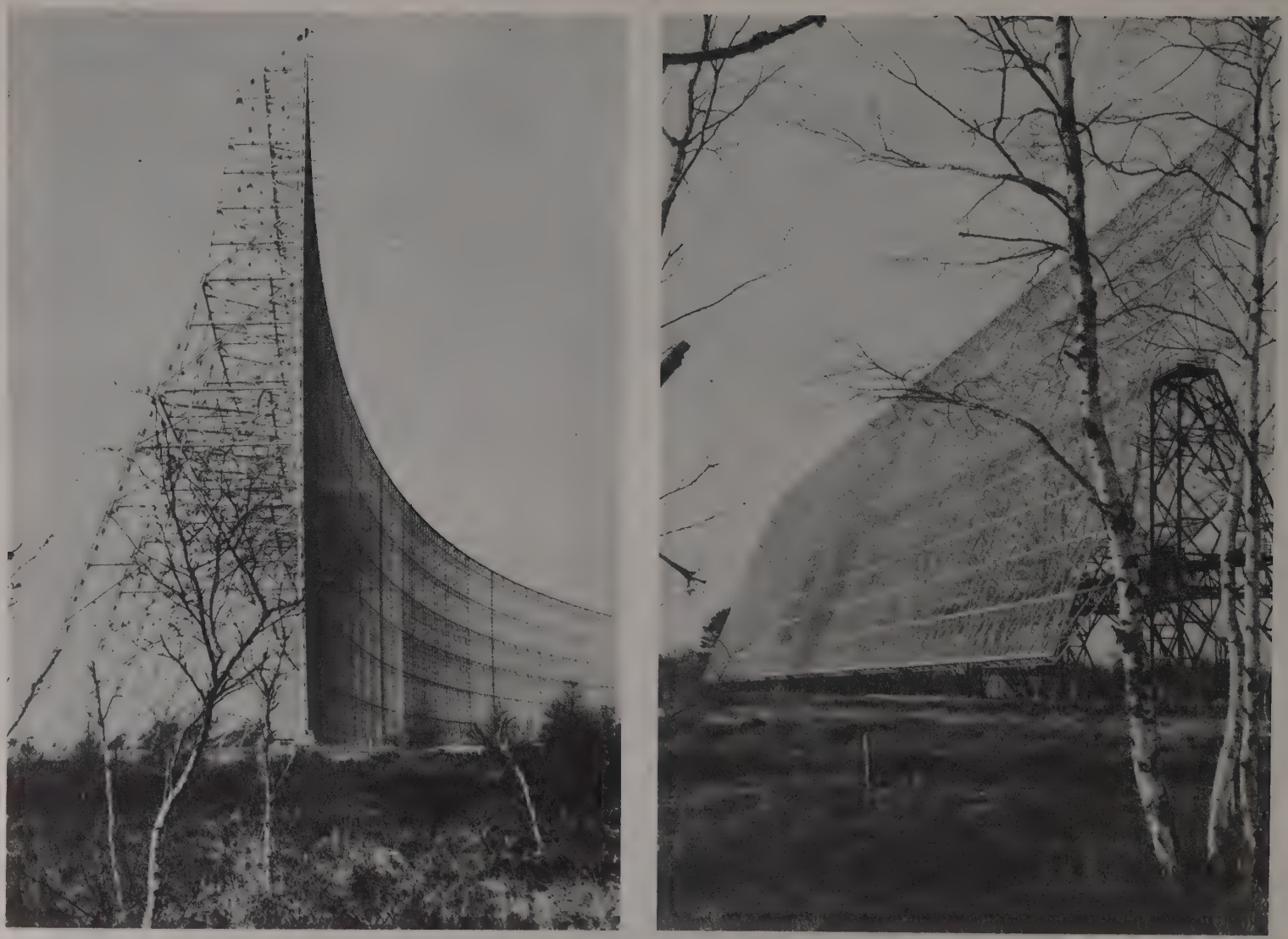


Figure III - Miroir Sphérique : montants principaux et contreventements.

Figure IV - Miroir Sphérique : assemblage des câbles porteurs et du treillis réflecteur.



Radiotélescope : Miroir Sphérique et Miroir Plan Mobile

La jante est elle-même fixée à deux poutres polygonales, l'une de 15 mètres de large et de 4 mètres de haut, l'autre de 10 mètres de large et de hauteur 8 mètres. Ces poutres se développent symétriquement par rapport à l'axe de rotation et supportent un plan de 800 m^2, constitué par des poutrelles horizontales espacées de 4 mètres.

Les câbles supportant le treillis réflecteur sont tendus verticalement à un espacement de 0,75 mètre et reposent par l'intermédiaire de cales réglables en hauteur tous les 4 mètres sur les poutrelles constituant le plan. Le réglage du calage en chaque point de passage des câbles permet d'ajuster la surface, par nivellement direct, à une excellente planéité.

La poutre-caisson formant l'axe repose par l'intermédiaire de deux tourillons tournant dans des paliers à rouleaux sur le sommet de deux pylônes de 21 mètres de hauteur. Afin de permettre le jeu de dilatation, l'un des paliers est fixe, l'autre peut glisser dans sa cage. Hormis ceux des extrêmités, chaque pylône est commun à deux miroirs. Les différents pylônes porteurs sont reliés entre eux par une passerelle (à 9 mètres de hauteur) formant contreventement, qui reçoit au milieu de chaque intervalle le dispositif d'entraînement (treuil à deux vitesses mû électriquement) mettant en mouvement de rotation les jantes semi-circulaires. (Poids de l'ensemble des pylônes et des passerelles : 270 tonnes).

La transmission est assurée par une double chaîne Galle (une chaîne principale, une chaîne de sécurité), fixée au tambour semi-circulaire tous les deux maillons (figure 5).

La charpente du miroir plan, plus légère (40 tonnes par panneau), est aussi plus fragile que celle du miroir sphérique. Le miroir doit donc être ramené en position horizontale lorsque le vent atteint une vitesse de 15 m/sec. Le centre de gravité étant placé notablement plus bas que l'axe de rotation, le couple de rappel vers l'horizontale est suffisant pour permettre le retour en position de repos, en cas de défaillance du mécanisme d'entraînement. L'existence de ce couple de rappel vers l'horizontale est une caractéristique importante qui a un retentissement considérable sur le comportement du miroir plan et contribue à compliquer notablement les problèmes de pointage (bibl. 4).

En tenant compte des pressions développées par le vent sur le treillis réflecteur et après des essais en soufflerie, la vitesse limite compatible avec les tolérances de surface, ou vent opérationnel, a été fixée à 10 m/sec. Une analyse portant sur 10 ans de mesures quotidiennes de la vitesse du vent, dans les stations météorologiques proches de Nançay, a montré que le choix de cette vitesse de 10 m/sec. limiterait seulement à 10 jours par an l'impossibilité d'utiliser le radiotélescope.

Le présent article porte :

- d'une part, sur les problèmes posés par l'implantation du miroir fixe, sur les contrôles de l'état de la surface réfléchissante ainsi que sur les approximations utilisées pour la mise en place de son extension à 300 mètres de longueur développée.

- d'autre part, sur l'étude du miroir mobile et de son comportement au cours de la rotation.

1 - Opérations d'implantation et de contrôle du miroir sphérique

L'axe de symétrie, ou axe principal, a été matérialisé par nos soins avant le commencement des travaux en juin 1959, par comparaison de l'azimut de son axe provisoire avec celui de α U. Min. L'azimut de cet axe a été mesuré, de manière précise, en décembre 1959, après le début des travaux, au théodolite Wild T4 par les soins de la Section des Travaux Spéciaux de l'Institut Géographique National (I.G.N.). Sa valeur est de 179°59'53". L'axe principal de l'instrument s'écarte de 7" de la trace du plan méridien. Cette correction a été jugée de faible importance, il n'en a pas été tenu compte.

Figure V : Miroir Plan. Charpente support du plan réflecteur.

Nous sommes convenus, dans ce qui suit, d'adopter un système local de coordonnées trirectangulaires, ayant pour axe des y l'axe principal défini ci-dessus. L'ensemble de l'instrument, miroir sphérique, miroir plan, voie focale destinée aux chariots porte-antennes a été construit avec cet axe des y comme axe de symétrie.

Contractuellement, la responsabilité des calculs et de l'implantation de l'instrument incombait au constructeur et au géomètre expert commis par lui.

La mise en place des sept montants principaux de la première phase du miroir sphérique a été effectuée par rapport à des points (gravés sur une poutre scellée dans des bornes en ciment) déterminés par le géomètre expert. Mais il est devenu rapidement évident que l'ampleur des travaux exigeait des moyens, tant en personnel qu'en matériel, qui imposaient le choix de l'Institut Géographique National, comme étant le seul capable d'assumer la responsabilité de l'implantation. En tant que représentant de l'Observatoire, j'ai assuré la liaison entre l'I.G.N. et le constructeur ; tous les problèmes d'implantation ont été discutés en collaboration étroite avec la Section des Travaux Spéciaux.

Une première mission I.G.N. a contrôlé la mise en place des montants principaux à partir de 5 points situés sur l'axe principal.

Les points gravés à la base des pylônes devaient se trouver à moins de ± 1,0 mm de leur position théorique. Dans ces conditions, les points primaires devaient être déterminés de manière notablement plus précise, soit ± 0,2 mm. Le problème était analogue pour le miroir mobile (plan), car il était indispensable de réaliser :

- l'alignement des axes de rotation
- leur horizontalité
- leur orientation Est-Ouest

à ± 1 mm de précision. (Les opérations sont rendues extrêmement difficiles par la nécessité où l'on se trouve de viser les points considérés à travers une forêt de poutrelles métalliques).

Pour la deuxième phase de travaux de construction du miroir, il a été nécessaire de multiplier les points primaires afin de ne pas perdre de précision sur les bords du miroir sphérique. De plus, l'établissement d'une triangulation reliant les points de base du miroir sphérique et ceux du miroir mobile s'est avéré indispensable à la compensation par la méthode des moindres carrés des éléments de l'implantation.

Le réglage de la surface réfléchissante a été effectué par le constructeur sous mon contrôle :

- soit, pour le miroir sphérique avec du matériel mis à notre disposition par l'I.G.N. (théodolites Wild T2 avec oculaires coudés pour visées zénithales)

- soit, pour le miroir plan avec du matériel fourni par l'Observatoire (niveau Wild NK2).

Afin de contrôler la qualité de la surface réfléchissante du miroir sphérique, l'I.G.N. a effectué une première détermination de 46 points répartis de manière homogène sur le miroir. Cette mission a permis de mettre en évidence un défaut systématique portant sur les montants secondaires (déport vers le Sud d'environ 6 mm des montants médians). Une deuxième campagne de mesures, portant sur 63 points répartis sur une surface de 20 m × 35 m, a confirmé l'existence de ce défaut, permis d'en trouver la cause et de remédier à celle-ci pour la deuxième phase des travaux. Enfin, une troisième campagne de mesures, portant sur une surface de miroir équivalente de l'extension a permis de constater que ce grave défaut avait été complètement éliminé.

Les calculs relatifs à l'altitude du centre et à l'implantation théorique du constructeur ont été exécutés simultanément par E. LE ROUX et par moi-même. Ils m'ont permis de définir, en collaboration avec la section des Travaux Spéciaux de l'I.G.N., le mode d'implantation simplifié.

2 - Etude du miroir plan

La première phase de construction s'étant achevée en mai 1961, j'ai effectué, sous la direction de J.L. STEINBERG et avec lui, les mesures de contrôle sur les indicateurs d'inclinaison du miroir plan fournis par le constructeur, ainsi que les mesures de déplacement des passerelles et du sommet des pylônes sous l'effet du couple de rappel vers l'horizontale.

Nous avons montré que la précision du pointage obtenue ne dépassait pas, dans les meilleurs des cas, ± 2' et que les appareils de lecture présentaient des défauts de fidélité qui atteignaient 3'.

Il était donc nécessaire de trouver une autre solution aux problèmes de pointage que celle apportée par le constructeur.

Dans le but de préciser les notions acquises, J.L. STEINBERG, J. LEQUEUX et J.P. GUILLET ont effectué en juillet 1962 l'étude des miroirs mobiles n° 5 et 6 qui a mis en évidence, d'une part une rotation différentielle de 7' d'arc entre le plan réflecteur et l'axe, entre les positions horizontales et verticales du miroir, d'autre part la déformation du plan réflecteur lui-même. Après renforcement de la liaison entre plan réflecteur et poutre-caisson, nous avons repris cette étude avec J.L. STEINBERG et confirmé les résultats précédents.

Toutefois, étant donné le mode opératoire employé, nous avons dû nous borner à étudier le comportement du miroir le long d'une ligne de plus grande pente et qui plus est, sur le rive du miroir, c'est-à-dire dans une partie en porte-à-faux par rapport au système de double poutre polygonale dont il a été fait mention ci-dessus. Pour nous assurer que ces mesures permettaient de connaître le comportement d'un panneau entier, nous avons demandé à I.G.N. de compléter ce travail en étudiant les déformations de 9 points pris aux noeuds de charpente et plus représentatifs de la structure. En mars 1963 les coordonnées X, Y, Z, des neuf points répartis sur les éléments n° 5 et n° 6 ont été mesurées par triangulation à trois inclinaisons des miroirs.

Enfin en février 1964, le premier élément mobile de la deuxième phase étant disponible, J.L. STEINBERG et moi-même avons vérifié, dans des conditions de travail très pénibles, que le comportement des nouveaux miroirs était identique à celui des anciens (les structures présentent de légères différences qui auraient pu modifier le comportement). Au cours des opérations de mise au point du dispositif de mesure de l'inclinaison, qui se sont poursuivies jusqu'au début de 1966, nous avons abordé le problème des déformations thermiques des pylônes.

A. – IMPLANTATION ET CONTROLES DU MIROIR SPHÉRIQUE

OPERATION D'IMPLANTATION

La configuration adoptée est donnée par la figure 2. Le centre de la sphère se trouve à 1,70 mètre au-dessus du plan du petit cercle formant base du miroir sphérique.

Les montants principaux sont contenus dans des plans diamétraux de la sphère, leurs sommets sont donc situés sur un petit cercle de celle-ci. En vue de leur mise en place dans leurs positions théoriques, le constructeur a demandé la matérialisation au sol des projections des sommets des montants principaux. Un arc de cercle de rayon 555,000 mètres a été défini par son sommet A et par les six points $B_i \ldots$, $C_i \ldots$, situés sur le cercle et tels que les cordes joignant deux points consécutifs soient égales et sous-tendent un angle au centre de $\frac{1}{56}$ de radian correspondant à un arc de longueur 10,000 mètres sur le parallèle de la sphère passant par les axes des pieds des montants principaux (le centre C de ce cercle situé sur l'axe principal n'a pas été matérialisé et ne figure ici que pour mémoire). Les plans diamétraux verticaux contenant chacun des points A, $B_i \ldots$, $C_i \ldots$, déterminent sur les parties fixes des pieds des montants principaux les points α, β_i, γ_i, faisant partie d'un cercle de rayon 559, 421 ± 0,001. Sur les couples de points $A\alpha$, $B_i\beta_i$, $C_i\gamma_i$, on pose une grande règle qui permet de définir les points p_i compris entre A, α, ... (figure 1) tels que $\alpha\ p_o, \ldots = 0,435$ mètre (soit $Cp_i = 558,986$).

Un théodolite Wild T2 mis en station en p, et réglé en visée zénithale (correction dite de Z_o effectuée), matérialise la verticale passant par p, c'est-à-dire la verticale passant par le sommet P du montant principal correspondant.

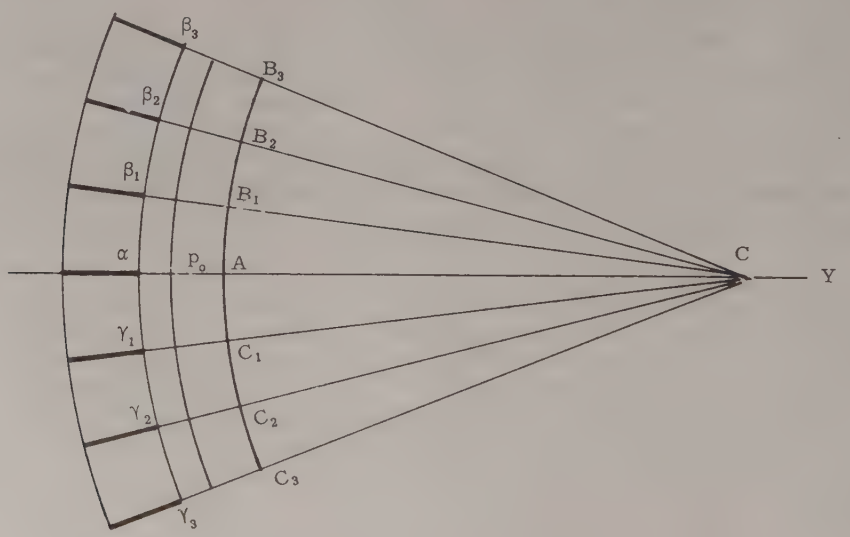


Figure 1 - Miroir Sphérique : centre de la sphère théorique (coupe)

Il suffit alors de donner à la tête du montant principal les mouvements nécessaires (par modification des calages sous les pieds avant, Nord, et arrière, Sud) pour amener P à la verticale de p, (figure 2).

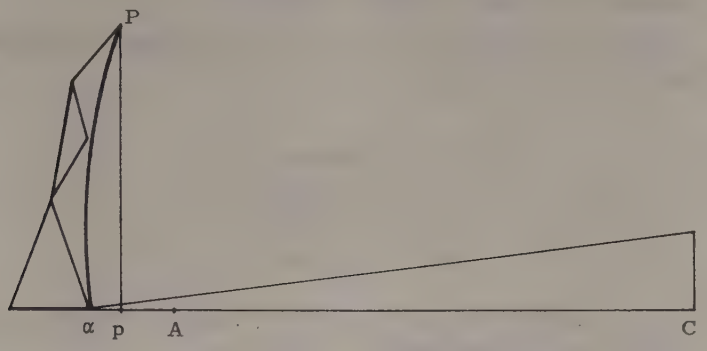


Figure 2 - Mise en place des montants principaux (plan).

Une fois cette opération effectuée pour tous les montants principaux, en tenant compte des réactions transmises par les contreventements sur les montants immédiatement voisins, on peut faire le réglage de la surface réfléchissante en mesurant la distance horizontale entre chaque point de passage des câbles porteurs du treillis sur le montant principal et la verticale Pp matérialisée par l'axe optique du T2.

Ces distances horizontales, ou flèches de la surface en section par un plan diamétral vertical, sont connues par le calcul (cf. ci-après).

On peut admettre que la position des points de réglage est connue à ± 2 mm dans la zone centrale du miroir, à ± 3 mm dans les parties hautes et basses. (Notons que ceci correspond à une précision relative considérable).

Les points définissant les montants principaux sur le cercle d'implantation ont été gravés (*) à leur emplacement théorique, puis réobservés. Les écarts entre coordonnées réelles et coordonnées théoriques sont ainsi définis à ± 0,1 mm.

En complément et à la différence de ce qui a été fait pour la première phase des travaux, nous avons matérialisé les points correspondants aux montants secondaires. Nous en verrons plus loin la raison, au § contrôle de la partie centrale du radiotélescope (page 153).

Calcul du rayon de la sphère

Données initiales théoriques dans le système I.G.N. :

- les coordonnées du centre x = 150,000
  y = 805,000
  z = 10,000

- le rayon du "petit cercle de référence" à 4,950 mètres au-dessous du plan diamétral horizontal (z = 5,050).

Est matérialisé un cercle de rayon 555,000 mètres.

(*) Les points sont gravés sur des plaques d'aluminium scellées au sommet de massifs de béton.

Les points gravés sur les pieds des pylônes sont à 4,421 mètres du cercle 555,000, soit sur un cercle R = 559,421 mètres.

La distance radiale entre ces points et la projection du sommet p_1 est : 0,435 mètre ; le rayon du cercle sommet est donc : 558,986 mètres.

En ajoutant la flèche théorique, on a le rayon de courbure mesuré sur les câbles horizontaux de réglage Ro

soit :

$$\begin{array}{r} 558{,}986 \\ + \quad 0{,}8079 \\ \hline \text{Ro} = 559{,}7939 \end{array}$$

et le rayon de courbure mesuré dans le plan intermédiaire entre les fils horizontaux et verticaux du treillis réflecteur (d'épaisseur 0,003 mètre)

$$R' = \text{Ro} - 0{,}0015 = 559{,}7924$$

(la sphère correspondante sera nommée sphère "treillis" pour abréviation).

Un contrôle par triangulation ayant été effectué sur miroir fixe, nous avons comparé cette valeur à celle mesurée directement sur la structure terminée.

Microtriangulation sur la partie centrale de la sphère :

Les coordonnées de 46 points ont été déterminées par I.G.N. par triangulation au T3 à boule de centrage, à partir de quatre stations au sol. On compare la coordonnée Y du point déterminé à celle du point théorique ayant même coordonnées X et Z.

Par suite d'une donnée erronée dans les plans C.F.E. (*), la valeur du rayon de la sphère prise par I.G.N. est de 559,786 mètres sur les câbles verticaux (soit une erreur de 6,4 millimètres).

Tous les Δy ayant été trouvés négatifs, une constante de 5,4 mm a été ajoutée, ce qui revient à donner les écarts par rapport à la sphère 559,7914. Pour les 28 points des montants principaux, la moyenne des valeurs absolues des écarts est 2,4 mm. En outre, si l'on compare le rayon de courbure déterminé par I.G.N. soit 559,7914 avec le rayon de la sphère "treillis" d'après les plans du constructeur et les cotes réelles d'implantation, c'est-à-dire : R = 559,7924, on voit que l'accord est remarquable.

Remarque :

I.G.N. a calculé par moindres carrés à la machine électronique la sphère moyenne passant par les 28 points considérés (sphère "treillis") ; les résultats sont :

- coordonnées du centre X = 150,039
  Y = 803,682
  Z = 9,9855
- Rayon 558,4738

Eu égard à la faible portion de sphère utilisée, les résultats sont satisfaisants.

(*) La Société constructrice, Compagnie Française d'Entreprises.

- le rayon diffère du rayon théorique de 1,31 mètres.
- le centre de la sphère moyenne calculée est à 0,040 mètre de l'axe principal.

La moyenne des valeurs absolues des écarts en Y est de 1,5 mm.

Problème de l'altitude du centre :

En fait, le calcul précédent ne tient pas compte d'une donnée importante caractérisant le miroir sphérique.

Les plans de charpente ont été exécutés d'après les calculs du constructeur, en prenant comme altitude du centre par rapport au sol (c'est-à-dire par rapport au plan du parallèle de la sphère formant base du miroir) h = 1,702 mètres (figure 3).

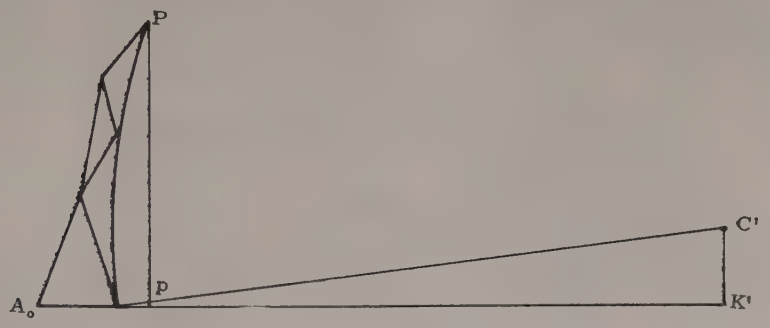


Figure 3 - Mise en place des montants principaux (coupe) avant surélévation.

Or l'altitude du foyer est à peu de chose près celle du centre de la sphère car les rayons sont réfléchis par le miroir plan sensiblement horizontalement. Compte tenu des dimensions physiques des antennes réceptrices, les responsables du projet ont jugé cette valeur de l'altitude du foyer trop faible et ont demandé au constructeur d'augmenter l'altitude du centre par rapport au sol d'environ 1 mètre.

Pour ne pas déformer la charpente, ni refaire une étude complète, la solution choisie fut de faire tourner le miroir d'un angle β autour d'un axe perpendiculaire au plan du méridien passant par le pied arrière Ao du montant axial. Examinons dans ces conditions le problème d'implantation.

Si l'on prend comme plan horizontal de référence le plan contenant Ao, le nouveau centre C'' se projette en c'' et C''c'' = 4,892 mètres (figures 4 et 5).

En prenant comme définitions :

B'' pied Nord (avant) du montant axial après surélévation,

K'' centre du parallèle de la sphère contenant B''

P sommet du miroir

ζ_m angle d'ouverture du miroir dans le plan vertical

K''_p centre du parallèle de la sphère définissant P

φ_m la demi-ouverture du miroir dans le plan perpendiculaire à $K''K''_p$

α définit la première altitude du centre par rapport au plan de base,

β définit l'angle de la surélévation.

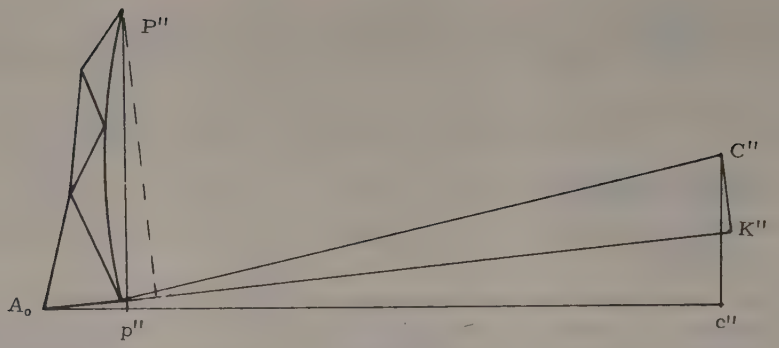


Figure 4 - Surélévation par rotation autour du pied arrière axial.

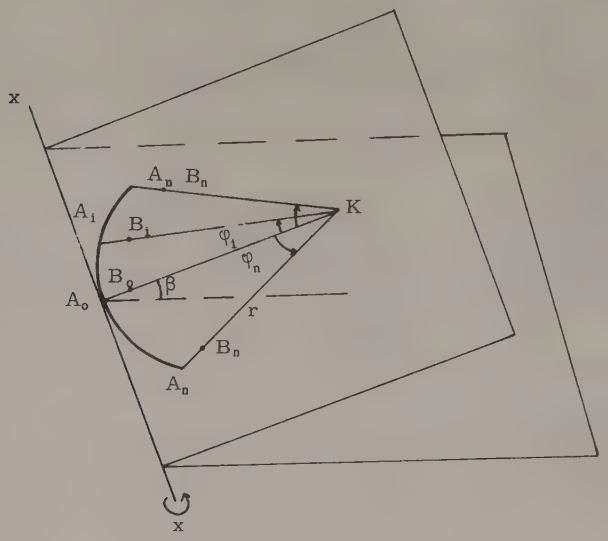


Figure 5 - Surélévation par rotation autour du pied arrière axial.

N. B.

Les angles définissant les différents montants principaux étant multiples de $\frac{10}{560}$ radians, nous caractériserons chaque montant par l'indice i

$$\varphi_i = i \times \frac{10}{560} \text{ radians}$$

Les montants extrêmes Est et Ouest seront caractérisés par le nombre

$$n = 15 = i_{max.} \text{ (figures 6 et 7).}$$

Un calcul géométrique simple montre que la différence d'altitude entre A_i et B_i est :

$$z_{(i)} = 13\ (1 - \cos \varphi_i)\ \sin \beta + z_o$$

Il en résulte que, sur les bords du miroir, la correction différentielle de calage entre pieds arrière et pieds avant en fonction de l'angle au centre φ_i définissant le pylône d'ordre i est de l'ordre de 0,8 mm. Toutefois cette correction se traduit par une rotation supplémentaire du montant par rapport au pylône axial, ou bien, ce qui revient sensiblement au même, équivaut à placer p_{15} sur le cercle théorique mais à modifier la valeur de réglage des flèches le long du pylône 15 pour donner un Δy positif (vers le Nord) au pied Nord du pylône.

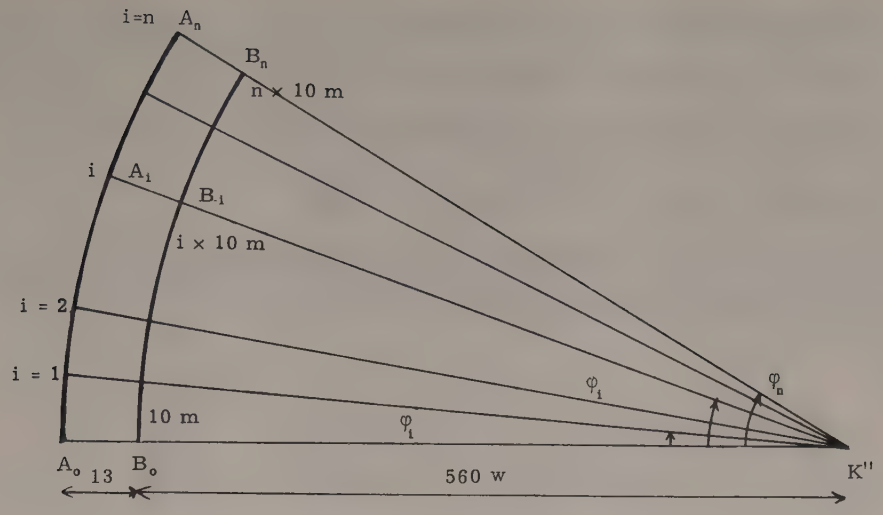


Figure 6 - Définition des paramètres de calcul.

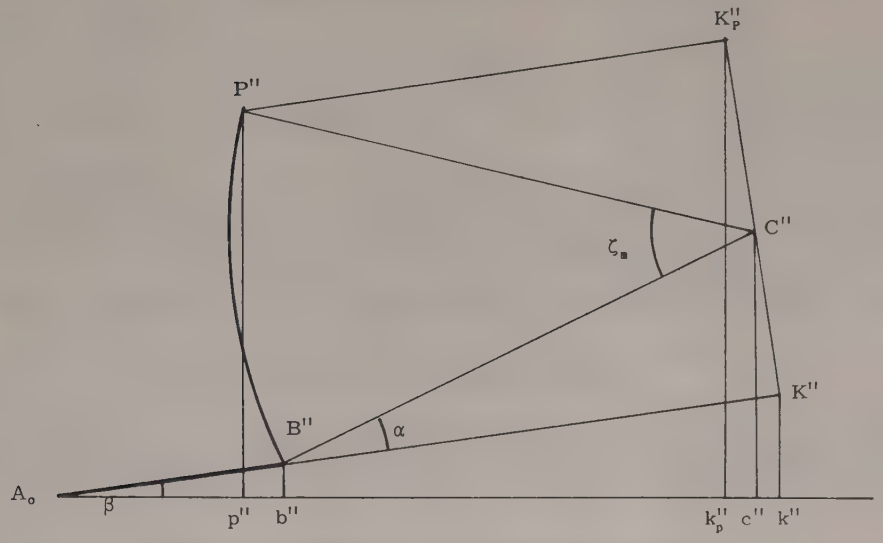


Figure 7 - Définition des paramètres de calcul.

Pratiquement cette correction est nulle pour i = 9 ; elle vaut :

1,13 mm pour les pylônes 10 et 11

1,57 mm " " 12 et 13

2,10 mm " " 14 et 15

En outre les différents parallèles de la sphère se projettent au sol suivant une famille d'ellipses, ce qui complique notablement le problème d'implantation.

Admettons que l'on construise la sphère à partir de la nouvelle altitude du centre en négligeant la rotation d'ensemble de l'angle β autour de l'axe perpendiculaire au plan de figure et passant par A.

Le parallèle au sommet du miroir se projette au sol suivant un cercle ; les centres des différents parallèles et le centre de la sphère se projettent sur le plan horizontal de référence en un même point.

Les paramètres définissant la sphère sont :

- rayon du petit cercle sommet du miroir.
- sommet de ce petit cercle (intersection avec l'axe principal).
- altitude du centre par rapport au cercle de base.
- altitude du sommet par rapport au centre.

Nous pouvons dès lors comparer le mode d'implantation du constructeur avec le mode simplifié défini ci-dessus, (en admettant en première approximation que φ et ζ sont identiques dans les deux modes). (figure 8)

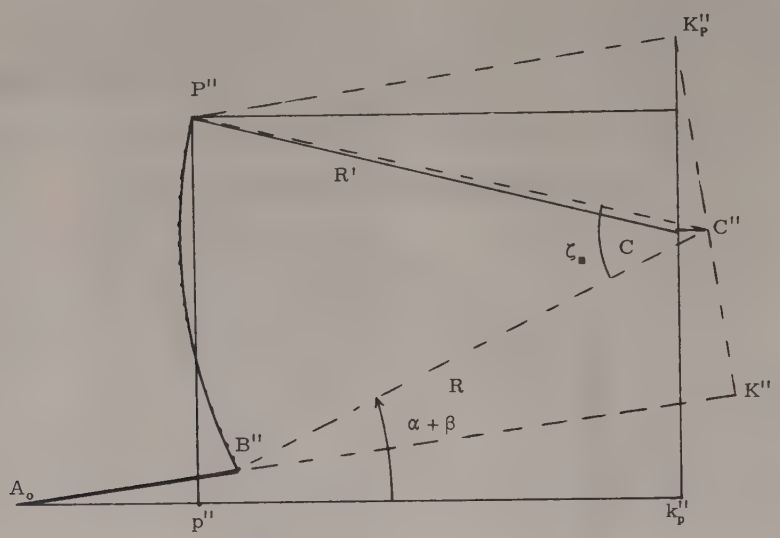


Figure 8 - Implantation simplifiée.

On montre que les écarts pour le dernier pylône n = 15, avec les données numériques suivantes :

$$\left(\begin{array}{l} \zeta_m = 62,3.10^{-3} \text{ rad.} \\ \beta = 1,76.10^{-3} \text{ rad.} \\ \alpha = 7.10^{-3} \text{ rad.} \\ \varphi_n = \frac{15}{56} \text{ rad.} \end{array} \right)$$

sont donnés par

$$dy = 0$$

$$dx = \frac{1}{2}\beta^2 \sin \varphi_n = 0,224 \text{ mm}$$

Les écarts sont donc négligeables.

Différence entre les rayons de courbure

Rappelons que :

R rayon sphère C.F.E.

R' rayon sphère simplifiée

on a :

$$R \cos\beta \cos(\zeta_n - \alpha) = R' \cos(\zeta_n - \alpha - \beta)$$

$$= R' \cos(\zeta_n - \alpha) \cos\beta + \sin\beta \sin(\zeta_n - \alpha)$$

$$\frac{R}{R'} = 1 + \operatorname{tg}\beta \cdot \operatorname{tg}(\zeta_n - \alpha)$$

$$= 1 + 55.5 \times 10^{-3} \times 1.76 \times 10^{-3}$$

$$\frac{R}{R'} = 1.000098$$

$$R = R' + 548 \times 10^{-4} \text{ m} \qquad = R' + 54,8 \text{ mm}$$

ce qui n'a pas grande importance en toute rigueur.

Il apparait donc strictement inutile de suivre à la lettre les plans du constructeur, ce qui permet une simplification considérable des calculs et des opérations d'implantation.

En fait, les pylônes et la charpente ont été mis en place avec les différents calages prévus par le constructeur pour ne pas introduire de torsion dangereuse ; les sommets des montants principaux ont été amenés à la verticale du cercle p'' de l'implantation simplifiée. La surface réfléchissante a été réglée suivant la même procédure simplifiée.

Le résultat de ceci est que le miroir présente deux défauts systématiques :

- Une variation d'altitude des P_i égale à 36 mm entre i = 0 et i = 15, alors que leur altitude reste constante dans le projet simplifié.

- l'introduction des corrections sur les flèches des pylônes extrêmes, erreur qui nous est imputable, qui affecte la surface d'une déformation inférieure à 2 mm sur les bords.

CONTROLES DE LA PARTIE CENTRALE DU RADIOTELESCOPE

Ils ont eu pour but de vérifier la qualité de la surface réfléchissante réalisée. (Cette opération a été évoquée au paragraphe précédent, page 145). 46 points de la surface réfléchissante ont été déterminés par microtriangulation au T3 à centrage à boule. (figure 9 : répartition des 46 points). Les points visés sont constitués par le treillis réflecteur lui-même. Les coordonnées des 46 points ont été calculées par la méthode des moindres carrés à la calculatrice électronique. Le rayon moyen d'indécision : 0,2 mm environ. (Diamètre des fils du treillis : 1,5 mm).

De cette manière ont été repérés :

- 28 points situés à environ 0,40 mètre des montants principaux et à quatre étages d'altitude : 1,0 m, 11,200, 22,100, 33,000,

- 18 points situés à l'étage n°2 (11,200 m) à proximité des montants intermédiaires.

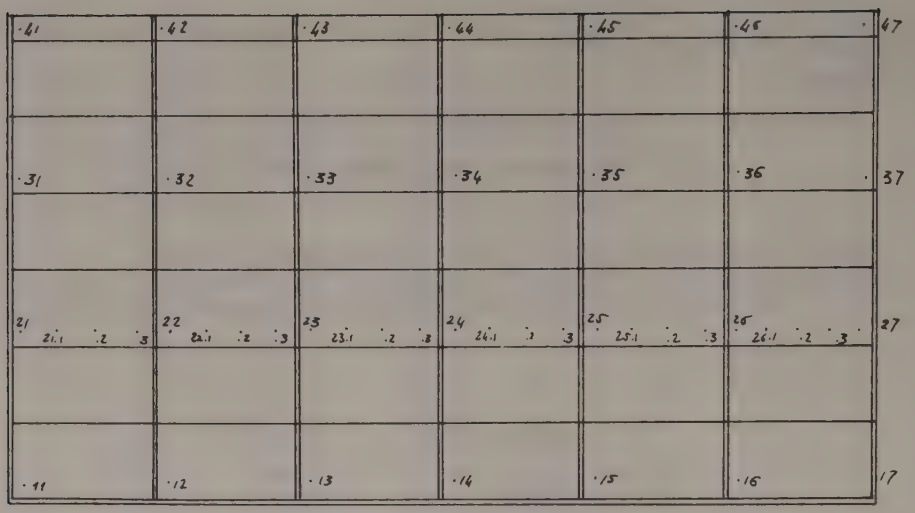
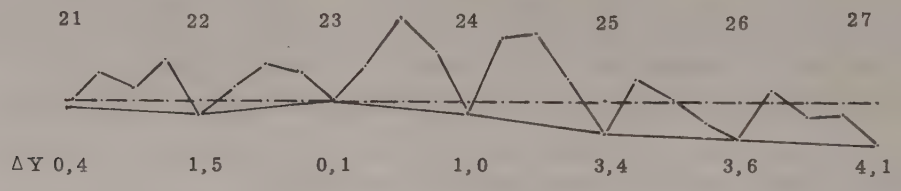


Figure 9 - Répartition des points de contrôle sur le miroir sphérique.

La figure 10 représente les écarts Δy des 25 points de l'étage n° 2 (altitude 11,200, soit 6,250 mètres au-dessus du plan diamétral horizontal) par rapport aux points théoriques du petit cercle de la sphère de rayon R = 559,7914 m ayant mêmes coordonnées X et Z que les points observés (*).



Echelle des Y 2/1 × 3/2 = 6/2 = 3/1

Figure 10 - Diagramme des écarts à la sphère théorique à l'étage n° 2.

Il est évident qu'il se manifeste :

- d'une part une erreur générale d'implantation des montants principaux correspondant à un angle de collimation de 15" (**).

- d'autre part une structure en arceaux des montants intermédiaires à la période de 10 mètres.

(*) Les points de l'étage n° 2 ont été observés deux fois à différentes températures pour essayer d'évaluer les déformations thermiques. Nous avons trouvé 1 mm de déplacement vers le Nord pour une augmentation de 5°C de température (bibl. 4, 5).

(**) La valeur de la collimation déduite des observations astronomiques et de la mesure du décalage entre l'ascension droite et le temps sidéral local de passages des radiosources les plus intenses est de 22" (bibl. 5).

Cette valeur est en bon accord avec la détermination géométrique.

L'étude de cette déformation en arceaux des potelets intermédiaires a été complétée en juin 1963 par la détermination par I.G.N. de 63 points répartis sur un rectangle de 20 mètres de large et de 35 mètres de haut, symétrique par rapport à l'axe principal du miroir.

La figure indique la répartition des points et les Δy mesurés par rapport aux points de la sphère R = 559,7914 ayant mêmes coordonnées X et Z que le point observé (figure 11).

Les coupes aux différentes altitudes sont rassemblées sur la figure 12 (les ordonnées représentant les écarts sont à l'échelle de 2 millimètres pour 1 millimètre d'écart).

L'écart entre la position réelle et la position théorique des montants intermédiaires est nettement visible du haut en bas du miroir, le maximum de déviation correspondant dans la presque totalité des cas au montant médian.

Une explication plausible de ce phénomène parait être la suivante :

- les éléments de la charpente du miroir fixe ont été découpés et percés par C.F.E. d'après des "patrons" tenant compte des différents rayons de courbure aux différentes altitudes. Ceci est en particulier le cas pour les charpentes de liaison entre montants principaux et montants intermédiaires. Pour simplifier les opérations de réglage, nous avons supposé qu'il serait suffisant d'amener à la verticale des points théoriques déterminés par I.G.N. les sommets des montants principaux (espacés d'environ 10 mètres), et que les montants intermédiaires viendraient obligatoirement se placer sur le petit cercle de rayon 558,986 mètres du fait de la raideur de la charpente de contreventement.

Le réglage de la structure dans le plan des montants intermédiaires fut effectué en mettant un T2 en station à la verticale du sommet de chaque montant, où qu'il se trouve, et en réglant les flèches aux différents niveaux de passage des câbles à leur valeur théorique. Tout se passe comme si les sommets des montants intermédiaires avaient été placés sur un autre cercle que les sommets des montants principaux.

Pour pallier ces inconvénients, nous avons pris la décision de matérialiser au sol les projections des sommets de chacun des montants principaux et intermédiaires, ce qui a imposé la multiplication des repères au sol, et a sensiblement accru la durée du réglage de la charpente.

Un nouveau contrôle, portant sur 63 points répartis sur la portion du miroir fixe comprise entre 50 mètres et 70 mètres d'abscisses curvilignes à partir de l'axe (I.G.N. septembre 1963), nous permet de constater que cette amélioration du réglage a complètement fait disparaître le phénomène extrêmement gênant de défaut à période 10 mètres de la surface réfléchissante (figure 13) (*).

Il convient de remarquer que la moyenne des Δy (calculée comme il est indiqué ci-dessus) est nulle. L'ensemble de la surface délimitée par les deux montants principaux d'ordre 5 et 7 (montant principal dans l'axe pris comme 0) se trouve rigoureusement dans sa position théorique. De plus la moyenne des valeurs absolues des écarts est 1,4 mm, ce qui est remarquablement faible et doit être porté au crédit du constructeur, lequel a réussi à confectionner, à partir d'éléments en acier marchand de coût peu élevé, mais au prix d'opérations de réglage longues et fastidieuses, une surface réfléchissante dont les tolérances sont très faibles.

(*) Le contrôle ci-dessus a été effectué deux fois :

- d'abord sur les câbles support du treillis (traits continus)
- ensuite sur le treillis réflecteur lui-même (traits interrompus).

Pour la comparaison des graphiques d'écart, il a été tenu compte de la demi-épaisseur du treillis. On voit que la pose du treillis n'occasionne que des déplacements minimes des câbles porteurs.

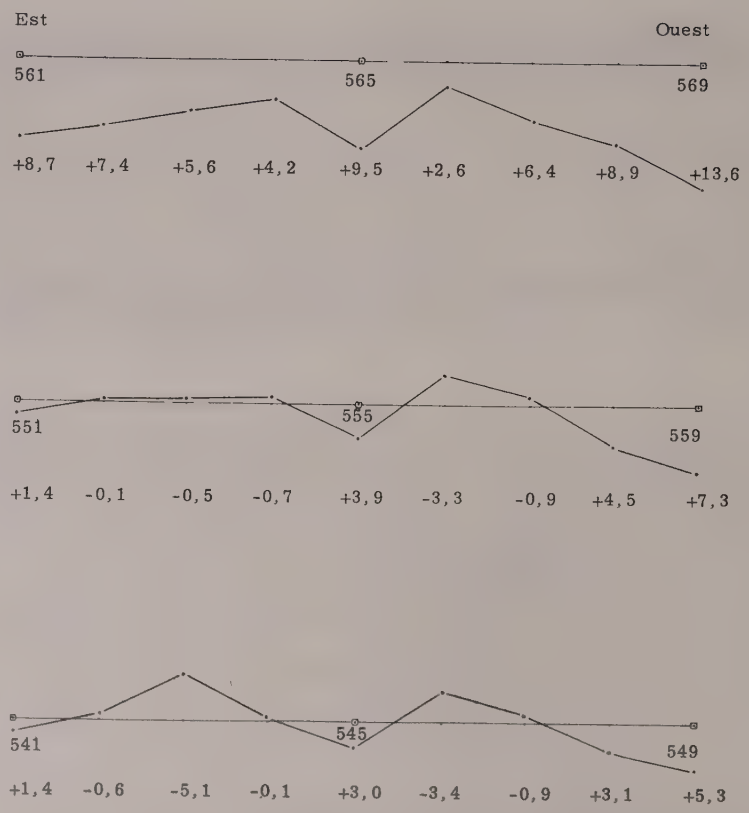
Contrôle du Miroir Sphérique

Portion centrale

Est									Ouest
+ 561	8,7 +	7,4 +	5,6 +	4,2 +	9,5 +	2,6 +	6,4 +	8,9 +	13,6
+ 551	1,4 -	0,1 -	0,5 -	0,7 +	3,9 -	3,3 -	0,9 +	4,5 +	7,3
+ 541	1,4 -	0,6 -	5,1 -	0,1 +	3,0 -	3,4 -	0,9 +	3,1 +	5,3
+ 531	0,5 -	1,7 -	4,1 -	2,3 +	0,2 -	3,0 -	2,8 +	0,5 +	3,4
+ 521	1,1 -	2,4 -	7,6 -	4,2 +	0,4 -	6,3 -	7,0 -	3,9 +	3,3
- 511	2,0 -	6,2 -	5,9 -	3,5 +	1,3 -	4,4 -	8,9 -	1,3 +	3,4
- 501	1,6 -	5,9 -	4,1 -	5,2 +	3,5 -	6,3 -	8,9 -	6,1 +	1,2

Figure 11 - Répartition des points de contrôle sur la partie centrale du miroir et valeur des écarts à la sphère théorique.

Contrôle du Miroir Sphérique
Portion centrale
Juin 1963
Ecarts à la surface théorique de la sphère suivant l'axe des Y



Contrôle du Miroir Sphérique
Portion centrale
Juin 1963

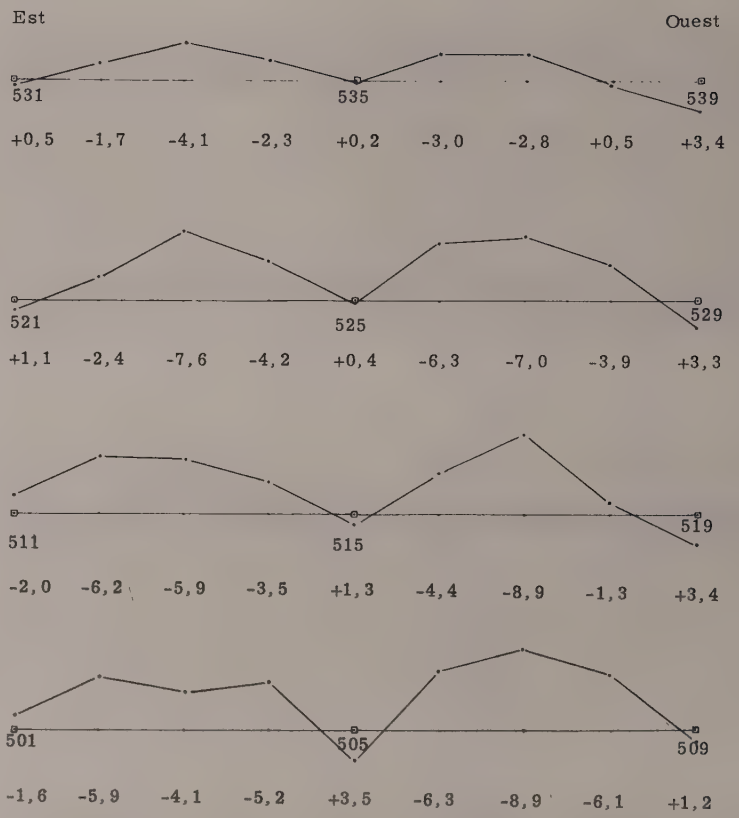


Figure 12 - Diagramme des écarts aux différents étages de la partie centrale.

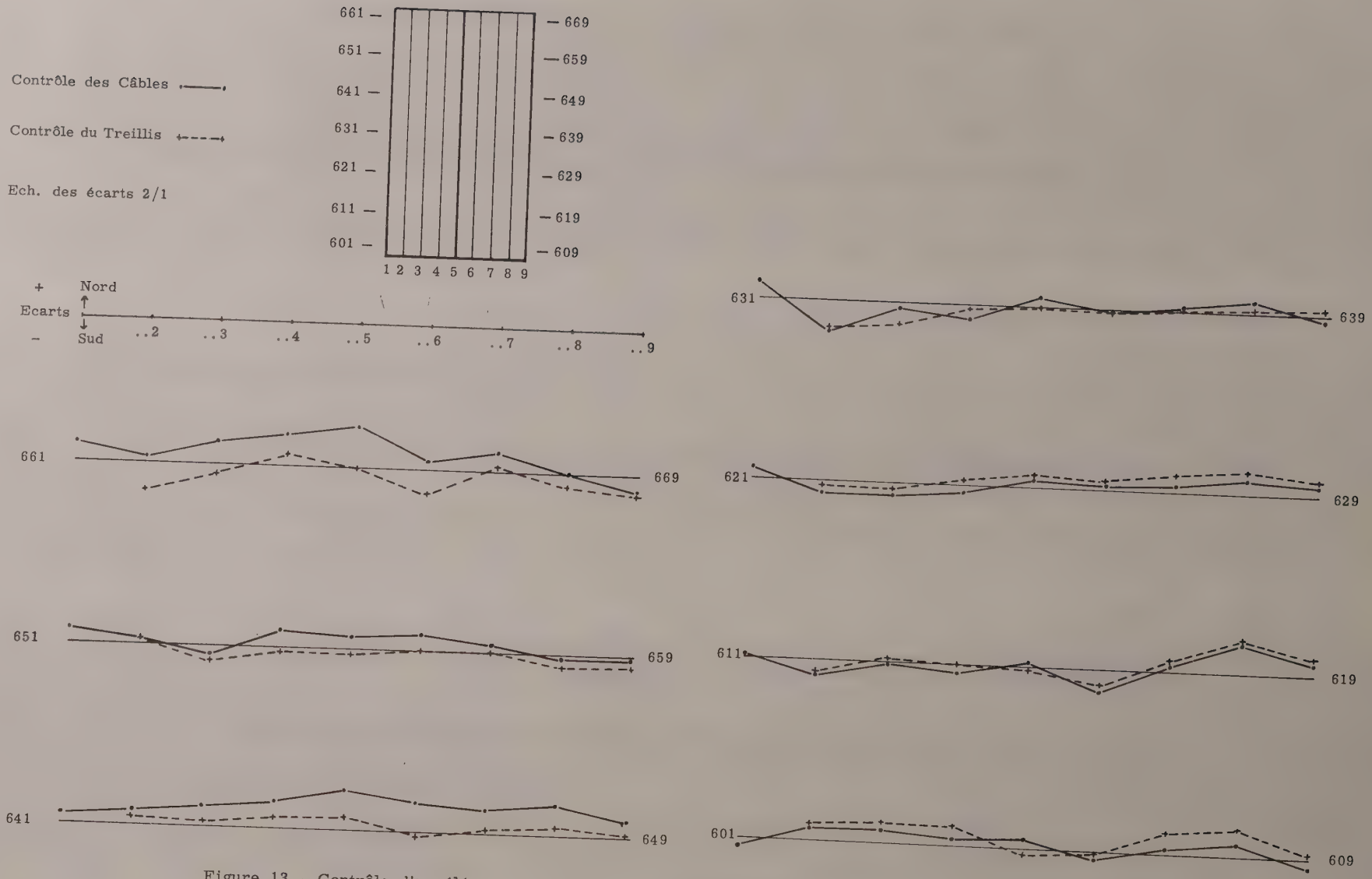


Figure 13 - Contrôle d'un élément de miroir de la deuxième phase de travaux. Diagramme des écarts.

La précision annoncée par le constructeur atteint les valeurs suivantes pour l'ensemble de l'instrument :

- sur les câbles support du grillage ; réglage à ± 1 mm.
- sur treillis posé, écarts par rapport à la surface moyenne ± 3 mm par endroits.
- pour la plupart des points : 2 mm.

En admettant que ces chiffres soient quelque peu optimistes, il n'en reste pas moins que la réalisation est excellente, eu égard aux grandes dimensions des éléments.

Nous examinerons, in fine, les déformations subies par le miroir sous l'influence des variations de température de charpente.

B. — MIROIR PLAN

ETUDE GENERALE

Une description détaillée n'entre pas dans le cadre de cet exposé. Seules quelques remarques sur la structure sont indispensables pour la clarté de l'étude de l'instrument (cf. introduction).

Les opérations d'implantation ont été effectuées avec la même précision que pour le miroir sphérique ; en effet le radiotélescope à deux miroirs est essentiellement un instrument méridien, il est donc affecté des mêmes erreurs que les lunettes méridiennes :

- collimation (cf. miroir sphérique)
- défaut d'orientation des tourillons par rapport à la direction Est-Ouest
- défaut d'horizontalité des tourillons,

auxquelles s'ajoutent :

- défaut d'alignement des axes des dix éléments mobiles
- non parallélisme des axes et des plans réflecteurs (bibl. 5).

Des précautions particulières ont donc été prises en collaboration entre l'I.G.N. et l'Observatoire pour assurer une précision de ± 1 mm sur la position des tourillons des miroirs, tant en azimut qu'en nivellement.

Bien que la partie principale de l'instrument soit constituée par le miroir sphérique, si nous admettons que ses déformations thermiques sont négligeables, la précision du pointage repose entièrement sur la mesure de l'inclinaison des éléments mobiles.

A la longueur d'onde de 21 cm, la dimension minimale du diagramme d'antenne mesuré dans le plan vertical est 23' environ. On peut donc admettre une erreur sur la distance zénithale de la direction correspondant au maximum du diagramme d'antenne, par rapport à la distance zénithale de l'astre, atteignant ± 2'. Compte tenu de la réflexion sur le miroir plan, l'inclinaison de ce dernier doit être connue à ± 1'.

En outre, les essais effectués à des longueurs d'onde plus courtes que celle prévue initialement (c'est-à-dire sur 13 cm, 6 cm et même 3 cm) ont montré qu'il serait extrêmement intéressant de pouvoir utiliser au maximum les possibilités de l'instrument sur ces longueurs d'onde. La diminution corrélative de la largeur du diagramme d'antenne dans le plan vertical entraîne une augmentation de la précision de pointage désirée.

En effet, si les dimensions dans le plan vertical du diagramme d'antenne sont approximativement de 14' à 13 cm et de 7' à 6 cm de longueur d'onde et si nous cherchons une précision de pointage équivalente au dixième de la largeur du lobe d'antenne, la distance zénithale de ce dernier devra être définie dans le ciel à ± 40" et l'inclinaison du miroir plan à ± 20".

Dans le but d'utiliser au maximum les possibilités de la structure et de ne pas les dégrader en limitant la précision du pointage, nous avons pris comme hypothèse de travail de rechercher dans la mesure de l'inclinaison du plan une précision de ± 15".

L'Observatoire a décidé, dans ces conditions, avec l'accord du constructeur, de reprendre à son compte l'étude complète du dispositif de mesure de l'inclinaison et en

particulier d'entreprendre l'investigation détaillée des différents paramètres susceptibles d'entacher d'erreur cette mesure.

Cette étude se divise en deux parties :

Dans le prochain chapitre, nous étudierons la stabilité des pylônes supportant les miroirs mobiles.

Dans le chapitre suivant, nous étudierons le comportement de la charpente des miroirs qui supporte le plan réflecteur du point de vue de la mesure de l'inclinaison de ce plan.

ETUDE DES DEFORMATIONS AU COURS DE LA ROTATION

I - STABILITE DES PYLONES ET DES PASSERELLES

Quel que soit le système utilisé pour mesurer l'inclinaison des plans réflecteurs, nous avons besoin d'une référence angulaire fixe dans l'espace. En admettant qu'elle soit constituée par les pylônes, nous devons étudier le comportement de ceux-ci. Les déformations possibles peuvent être de deux ordres :

1/ Celles dues au couple de rappel des miroirs mobiles

Le centre de gravité de ce dernier n'est pas sur l'axe de rotation. Cette condition a été imposée au constructeur afin qu'il soit possible de ramener les miroirs en position horizontale en cas de défaillance des moteurs électriques des treuils et dans le cas où le vent atteindrait la vitesse de 15 m/sec, (jugée dangereuse pour le treillis réflecteur). Il en résulte que le miroir est en équilibre en position horizontale, le centre de gravité étant à la verticale et en-dessous de l'axe de rotation. Les efforts sont alors verticaux aussi bien sur les pylônes que sur la passerelle.

Lorsque le miroir est mis en rotation vers la verticale, il apparaît un couple de rappel tendant à ramener le miroir en position horizontale. Ce couple se traduit par une force orientée vers le Sud et appliquée à la passerelle sur son milieu ; cette force tend à déplacer la passerelle jusqu'à l'équilibre. Les pylônes étant rigidement encastrés à la base, il apparaît à leur sommet une force en sens contraire qui tend à les déplacer vers le Nord (figure 14).

2/ Celles dues aux différentes expositions des diverses parties de la charpente des pylônes au rayonnement solaire.

Cette dernière question sera traitée plus loin.

- Torsion des pylônes sous l'effet du couple de rappel des miroirs

1/ Mesures des déplacements linéaires du pylône (6 - 7), de la passerelle au niveau du treuil n° 6, du pylône (5 - 6).

Toutes ces mesures ont été effectuées à partir du sol. Un réglet gradué définit la position de la partie de charpente étudiée. Un théodolite Wild T2 mis en station au sol à la verticale du point étudié est pointé en direction du réglet. On lit directement dans la lunette qui reste fixe les graduations du réglet qui défilent devant le réticule, quand le miroir est amené de l'horizontale à la verticale.

Les déplacements observés dans les trois cas sont bien ceux qui ont été prévus. Les amplitudes atteignent respectivement :

- 2,5 mm vers le Nord, soit un déplacement angulaire de 25" pour le sommet du pylône (6 - 7), en déplaçant le seul miroir n° 6.

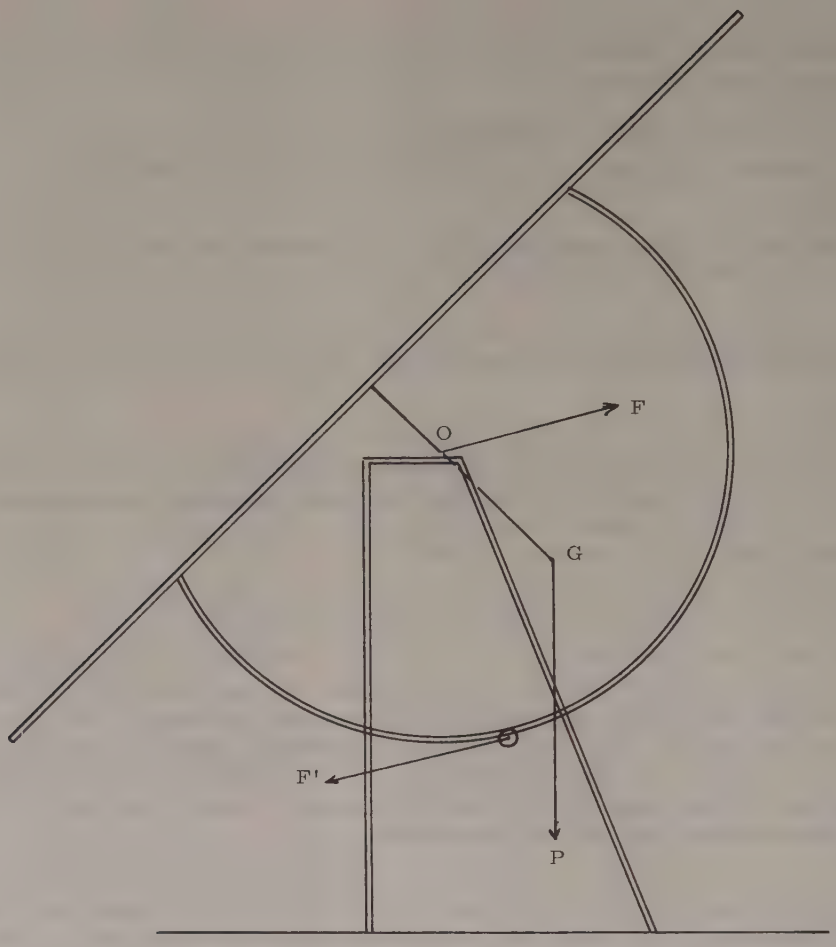


Figure 14 - Couple de rappel du miroir plan, répartition des efforts sur la passerelle et les pylônes.

- 4 mm vers le Sud pour la passerelle au niveau du treuil n° 6.

- 5 mm vers le Nord pour le sommet du pylône (5 - 6) quand on amène les miroirs 5 et 6 de l'horizontale à la verticale.

On voit donc que l'erreur qui entache la mesure de l'inclinaison faite par les indicateurs liés aux treuils peut atteindre 2' du fait de la composition des déplacements de la passerelle et du sommet des pylônes.

2/ Etude plus précise du mouvement du sommet du pylône.

La précision des mesures de déplacement nous a paru tout juste suffisante. De plus, nous ne disposions pas de nivelle assez précise pour effectuer des mesures différentielles. Pour résoudre ce problème, nous avons fixé rigidement le T2(*) à une poutre en H de 300 mm de côté ; après avoir rendu son axe de rotation vertical, nous l'avons astreint à viser un point déterminé (mirette de triangulation fixée au pilier définissant l'axe du radiotélescope). Les mesures ont été effectuées dans une seule position de la lunette par rapport au cercle vertical. Nous supposons en première approximation que les mouvements Est-Ouest du sommet du pylône sont négligeables. D'autre part, il nous faut tenir compte du fait que le T2 vise un point à distance finie et que le mouvement propre du théodolite par rapport au point de visée n'est pas négligeable.

(*) Théodolite WILD-T2.

L'amplitude brute totale de l'inclinaison mesurée atteint 170 dmgr. La valeur de la correction est de + 15 dmgr. Donc la valeur finale de l'inclinaison du sommet du pylône (5 - 6) est de 185 dmgr. = 60".

L'amplitude est sensiblement double de celle mesurée au 1/, mais on voit sur le graphique des irrégularités qui correspondent à l'attaque par les dents du pignon d'entraînement des maillons de la chaîne. (figure 15, courbe en traits continus).

Ces déductions sont corroborées par des mesures à intervalles rapprochés (toutes les 12' sur 3° au voisinage de 45° d'inclinaison). (figure 16).

L'amplitude des irrégularités atteints 10". Il résulte de ceci que la régularité de l'entraînement devra être considérablement améliorée au cas où une solution au problème de la mesure de l'inclinaison imposerait la fixation d'un appareillage au sommet du pylône.

Nous avons porté sur la figure 15 les inclinaisons en fonction du couple de rappel de quatre pylônes (M2 : pylône entre miroirs 2 et 3, M4 entre 4 et 5, M7 entre 6 et 7, M9 entre 8 et 9). Les inclinaisons des pylônes ont été mesurées deux par deux dans les mêmes conditions de température (novembre 1965 par temps couvert dans l'après-midi et la soirée), les dix miroirs étant pointés à la fois, pour éviter des réactions entre pylônes. Les courbes tracées représentent la moyenne entre l'aller et le retour, à l'horizontale, le phénomène étant entaché d'une hystérésis atteignant 10".

On voit que des différences substantielles de comportement se manifestent d'un pylône à l'autre, bien que les pylônes soient tous identiques par construction. Au cas où les références du système de mesure de l'inclinaison des miroirs seraient liées aux différents pylônes, ce phénomène impliquerait une correction différente pour chacun d'eux et par conséquent une complication sensible de l'étalonnage.

- Déformations thermiques des pylônes

Nous avons abordé l'étude de cette question par deux méthodes différentes :

- en mesurant d'heure en heure au théodolite l'inclinaison absolue des miroirs bloqués du lever au coucher du soleil à l'inclinaison 60° et en la comparant aux mesures d'inclinaison faites à partir du système lié au sommet des pylônes.

- en déplaçant continuellement pendant une journée les miroirs entre les inclinaisons 10° et 70° et en mesurant à chaque borne de l'intervalle les inclinaisons absolues du sommet du pylône au moyen de deux nivelles de précision d'origines décalées. Cette méthode superpose évidemment la composante thermique et celle due au couple de rappel, mais permet de vérifier l'indépendance des deux phénomènes. Ces mesures ont été poursuivies au moyen d'une nivelle à électrolyte permettant une transmission à distance de la mesure de l'inclinaison d'un pylône (Electrolevel). La sensibilité est de ± 100" pour toute l'échelle avec une bonne fidélité.

Dans l'état actuel ces mesures sont très fragmentaires et demandent à être poursuivies. Néanmoins, les résultats se corroborent parfaitement. Les deux premières techniques nous ont montré que les pylônes exposés au rayonnement solaire direct basculent vers le Nord. La déformation croît du lever du soleil jusqu'à 14 heures T.U. et décroît ensuite pour reprendre sa valeur initiale après le coucher du soleil. L'amplitude est comprise entre 43" et 1'15".

La troisième technique de mesure tendrait à prouver que, dans des conditions stables de température, et quelle que soit la valeur de celle-ci, l'amplitude de l'inclinaison due au couple de rappel soit constante (figure 17 l'inclinaison du sommet du pylône n° 6-7 a été mesurée en fonction de l'inclinaison des dix miroirs dans différentes conditions atmosphériques, les ordonnées des origines ont été décalées pour accroître la lisibilité). Un programme de mesures systématiques est en cours actuellement.

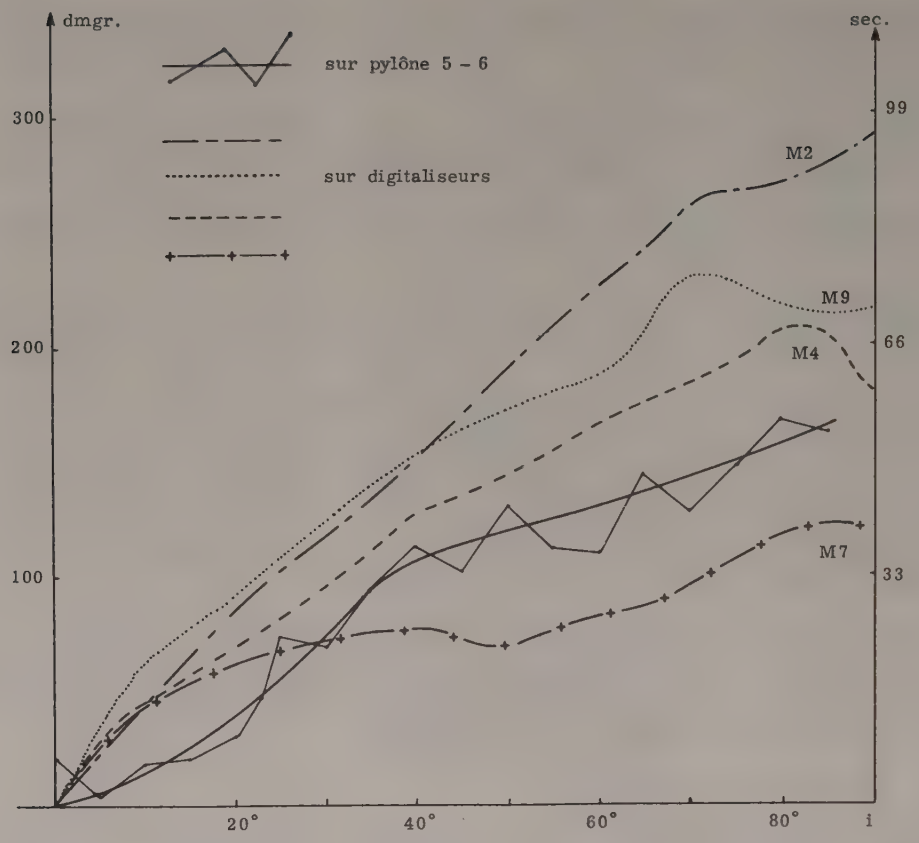


Figure 15 - Inclinaison de pylônes (en ordonnées) sous l'effet du couple de rappel. Variation avec l'inclinaison des miroirs (en abscisses).

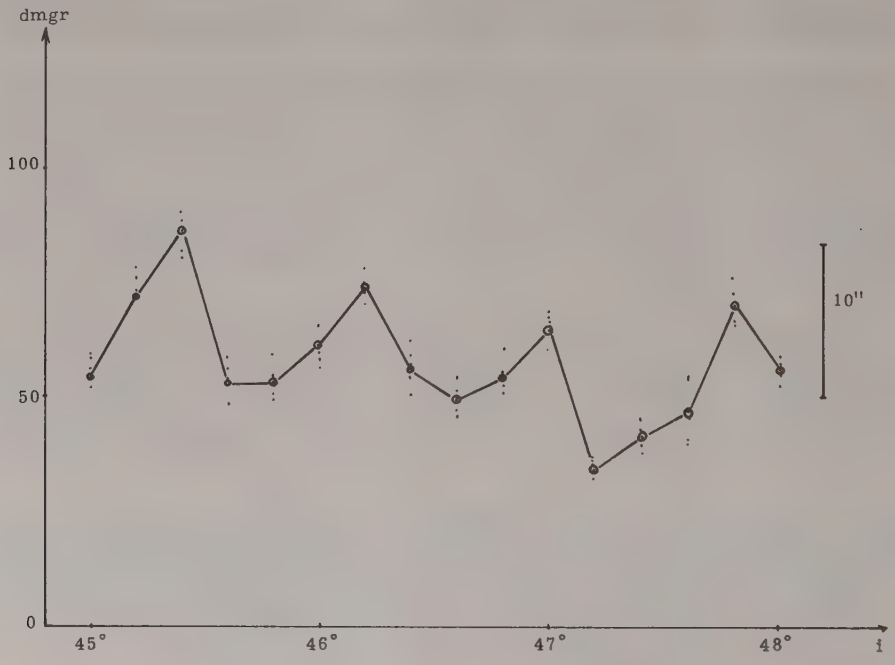


Figure 16 - Portion de la figure 15 agrandie mettant en évidence les défauts de l'entraînement.

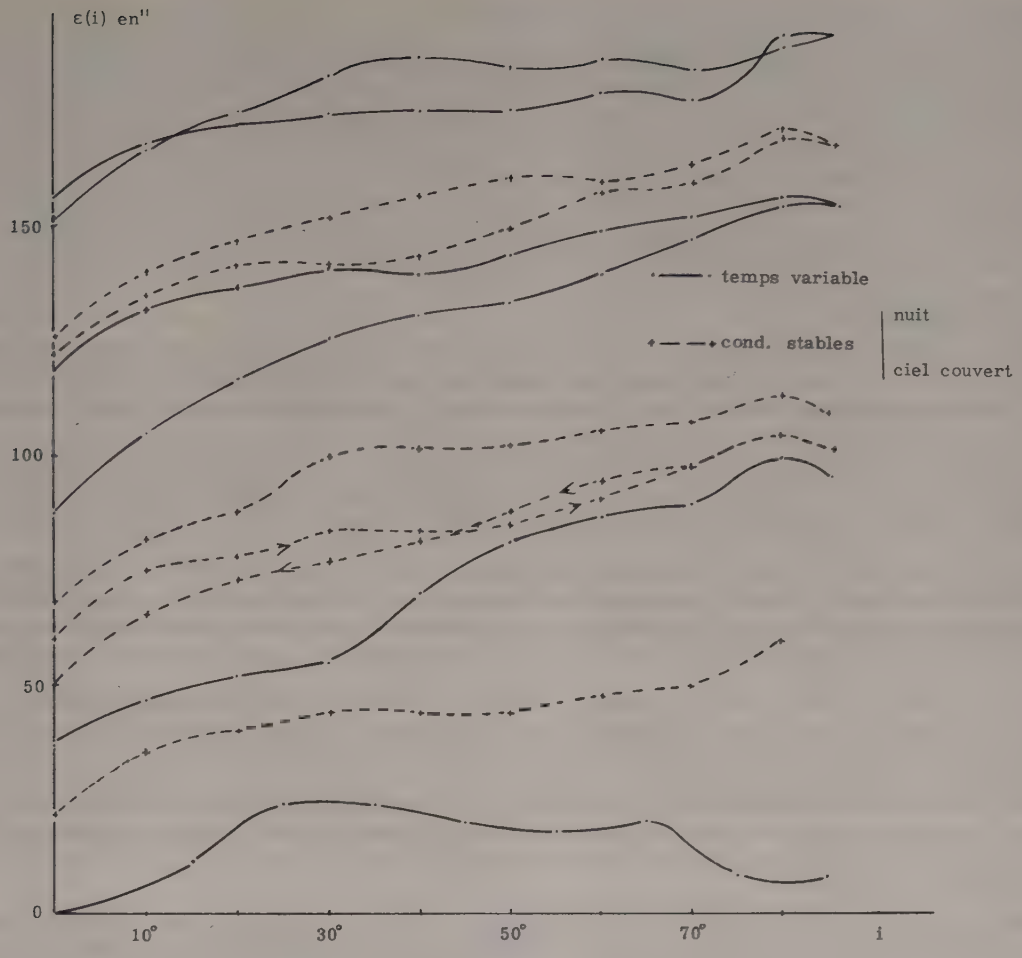


Figure 17 - Influence de la température de la charpente sur l'inclinaison des pylônes sous l'effet du couple de rappel des miroirs.

II - COMPORTEMENT DE LA LIAISON ENTRE AXE DE ROTATION ET PLAN REFLECTEUR. DEFORMATIONS PROPRES DES MIROIRS

Un ensemble de mesures optiques a été effectué sur les miroirs mobiles de la première phase des travaux.

Ces mesures avaient pout but :

1/ d'étudier les mouvements du caisson poutre et des tourillons par rapport au plan du miroir. Ces déplacements avaient été constatés par nous lors du réglage des câbles supportant le grillage, avant la pose de ce dernier et avant la mise en service du dispositif de pointage.

2/ d'étudier les déformations du plan réflecteur au cours de la rotation. Ces dernières mesures ont permis de connaître le plan réflecteur effectif au point de vue radio et la manière dont il se déplace par rapport à la charpente. Ces données sont indispensables à l'établissement du projet de mesure de l'inclinaison.

1 - Mesure des déplacements du caisson poutre

Les premières mesures faites au montage utilisaient un niveau à lunette bridé sur une face du caisson poutre en son milieu. Elles avaient montré un déplacement apparent du plan de 3' environ par rapport à cette face de référence au cours de la rotation. Un tel déplacement rendait déjà illusoire toute mesure précise de l'inclinaison en bout des tourillons. Après plus ample réflexion sur ce point important, on a pensé que le poids porté par le caisson doit le déformer au cours de la rotation, de telle façon que sa section ne doit pas rester carrée. Il suffit qu'une diagonale de la section (carré de 1 mètre de côté) varie sous l'effort de 0,5 mm pour entraîner un déplacement de la base du niveau.

a) Dispositif :

Pour éviter cette difficulté une lunette a été fixée en bout du tourillon Ouest du miroir n° 5. Cette lunette (extraite d'un tachéomètre GOULIER) a été montée de façon à ce que son axe optique coupe l'axe des tourillons. La flexion du tube de la lunette et la variation de cette flexion avec l'angle d'inclinaison sont certainement négligeables. Au cours de la rotation du miroir, l'axe de la lunette balaie un plan méridien. L'instrument peut être tourné autour de son axe horizontal et bloqué à une distance zénithale quelconque. Un cercle gradué permet de mesurer les angles de rotation à un centigrade près (0,5).

Sur le miroir ont été montées des piges portant chacune 20 cm de règle graduée (à chiffres noirs sur blanc), perpendiculairement à la surface du grillage. La position d'une graduation donnée par rapport à la surface du miroir est connue pour chacune des piges. Aucun mouvement de ces règles perpendiculairement au plan réflecteur n'est possible.

On a monté quatre de ces piges, sous le grillage, dans un plan méridien situé à 180 cm à l'Est du fer de rive (Ouest). Les distances à l'axe étaient d'environ 4, 8, 12 et 20 mètres, elles ont été mesurées à ± 2 mm.

Par suite de la géométrie du système, il n'a malheureusement pas été possible de monter des piges au Sud du caisson car on n'aurait pas pu les viser du tourillon.

b) Mode opératoire

Le miroir étant à peu près horizontal, on vise une graduation donnée d'une pige donnée ; la lunette étant bloquée. On met le miroir en rotation GV avec arrêts de 10° en 10°. A chaque arrêt, la division visée est notée. Il est clair qu'en l'absence de déformations du plan et de rotation du caisson par rapport à ce plan, les lectures faites devraient rester constantes.

Les lectures ont été faites en allant vers la verticale, puis en revenant vers l'horizontale, successivement sur chacune des piges (aller et retour).

c) Résultats

Les résultats obtenus sur la partie Nord du miroir 5 font apparaître une rotation du caisson par rapport au plan. Cette rotation a le sens suivant : quand le miroir va vers la verticale, le caisson tourne plus vite que lui. Cet effet est dû au poids de la charpente du plan qui tend à entraîner la face supérieure du caisson vers le bas. Il est dû aussi aux efforts de la passerelle sur le tambour d'entraînement. En effet, quand on va vers la verticale, la passerelle est de plus en plus sollicitée vers le Sud du fait de la position du centre de gravité. Il y a donc une réaction tangentielle vers le Nord qui va dans le même sens que le poids de la charpente du plan.

La rotation différentielle présente aussi une forte hystérésis. A 40° d'inclinaison, l'amplitude de ce phénomène atteint 1' pour la pige n° 1, la plus éloignée de l'axe. L'hystérésis est moins importante pour les autres piges. Pour la plus proche de celles-ci (pige n° 4) la courbe obtenue commence à s'aplatir quand on approche de la verticale, ce qui doit correspondre à des déformations locales du plan, dues aux efforts transmis par le caisson dans sa rotation.

De plus, les angles dont semblent tourner les piges par rapport aux tourillons ne sont pas les mêmes pour toutes. Cet angle croît systématiquement quand la pige considérée s'éloigne du centre. On a calculé la distance de visée pour chacune des piges. On voit facilement que l'erreur commise du fait que l'on ne vise pas perpendiculairement à la réglette est négligeable. Les résultats sont portés sur la figure 18. En ordonnées la rotation apparente de chaque pige par rapport à la position horizontale du miroir. Seule la courbe concernant la pige 1, la plus éloignée, a une allure normale. Les autres sont de plus en plus déformées quand on se rapproche de l'axe. A 40° l'hystérésis des quatre courbes est sensiblement la même : environ 3.10^{-4} radians, soit 1'.

Même si l'on élimine la région d'inclinaison supérieure à 60° et que l'on extrapole les courbes restantes, il semble que la rotation des quatre piges ne soit pas la même et augmente quand on s'éloigne de l'axe. Les autres mesures ont montré que le miroir se déforme en toit inversé vers la verticale. Qualitativement ce phénomène ne peut qu'éloigner les unes des autres les courbes de la figure 18. Il subsiste là un phénomène inexpliqué.

Les mêmes mesures ont été renouvelées le 2 mars 1963 après renforcement de la liaison entre la poutre caisson et la charpente support du plan réflecteur. Ce renforcement était rendu nécessaire par la trop grande flexibilité des ferrures radiales reliant le tambour d'entraînement aux poutres support du plan réflecteur. Ces résultats sont portés sur le diagramme n° 19. Il est clair que, si la rotation du plan par rapport au caisson n'a pas diminué d'amplitude, les différentes parties du plan tournent sensiblement de la même manière, au moins jusqu'à 60° d'inclinaison. Un gain appréciable a donc été réalisé au moyen du renforcement de la charpente.

d) Conclusion

Il est impossible de mesurer l'inclinaison du miroir à partir des tourillons. La rotation du caisson par rapport au plan est confirmée. Elle est deux fois plus importante que les premières mesures ne l'avaient indiqué. Le poids du grillage ne semble pas suffisant pour expliquer cette augmentation. Par contre, les déformations du caisson et l'introduction des réactions de la passerelle dont on a parlé plus haut, semblent suffisantes à elles seules.

D'autre part, l'hystérésis mise en évidence ne semble pas justiciable d'une courbe de correction. Ce phénomène gênant se manifeste encore dans la forme du plan réflecteur au voisinage du caisson comme on le verra plus loin.

2 - Mesure de la planéité du miroir

Des mesures de déformation ont été faites dans un plan méridien seulement, car ce sont les seules possibles une fois le grillage posé. Mais il n'existe, en principe, aucune force extérieure s'exerçant sur la charpente qui ne soit pas contenue dans un plan méridien. On peut donc espérer que les déformations mesurées soient typiques de ce qui se passe dans les autres plans méridiens contenant les fermes principales et secondaires des miroirs mobiles.

a) Dispositif :

Les mesures ont été faites dans un plan méridien situé à 150 mm du fer formant rive extérieure des miroirs 5 et 6. Le niveau Maubant utilisé a été monté sur une console, solidement fixée par quatre boulons de 16 mm au fer de rive (*). Le miroir radio étant

---

(*) Après avoir pris l'avis des personnes compétentes de la Section des Instruments de l'I.G.N., l'appareil retenu pour ces mesures est un niveau Maubant dont l'axe vertical, court et massif, est peu suspect de tendance à la déformation lorsqu'on incline le plan de base du niveau.

En outre, la lunette à collimation réglable, fixée par un système de vés et contre-vés tourne de 180° autour de son axe optique et peut être retournée bout pour bout.

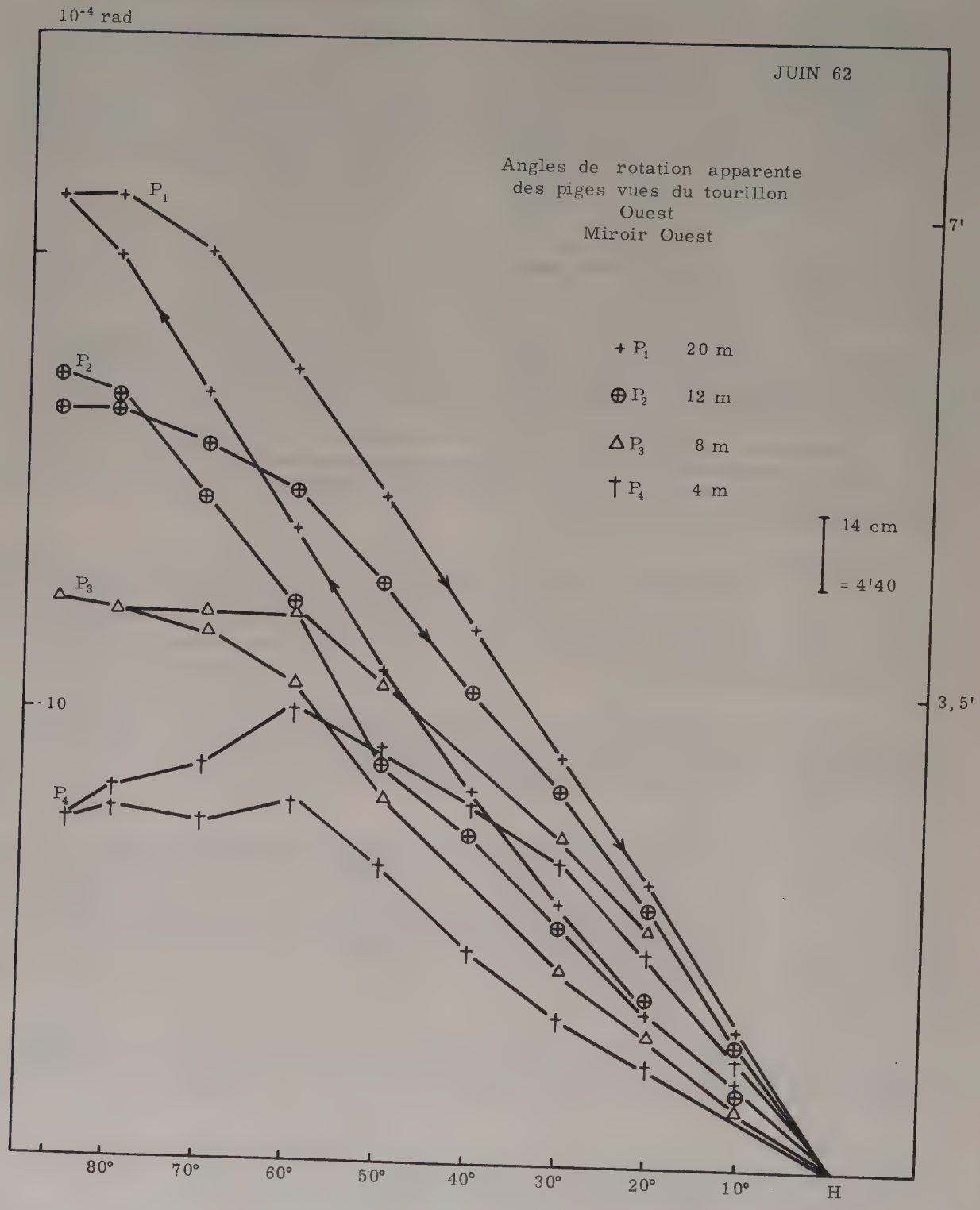


Figure 18 - Rotation apparente de la charpente par rapport au tourillon.

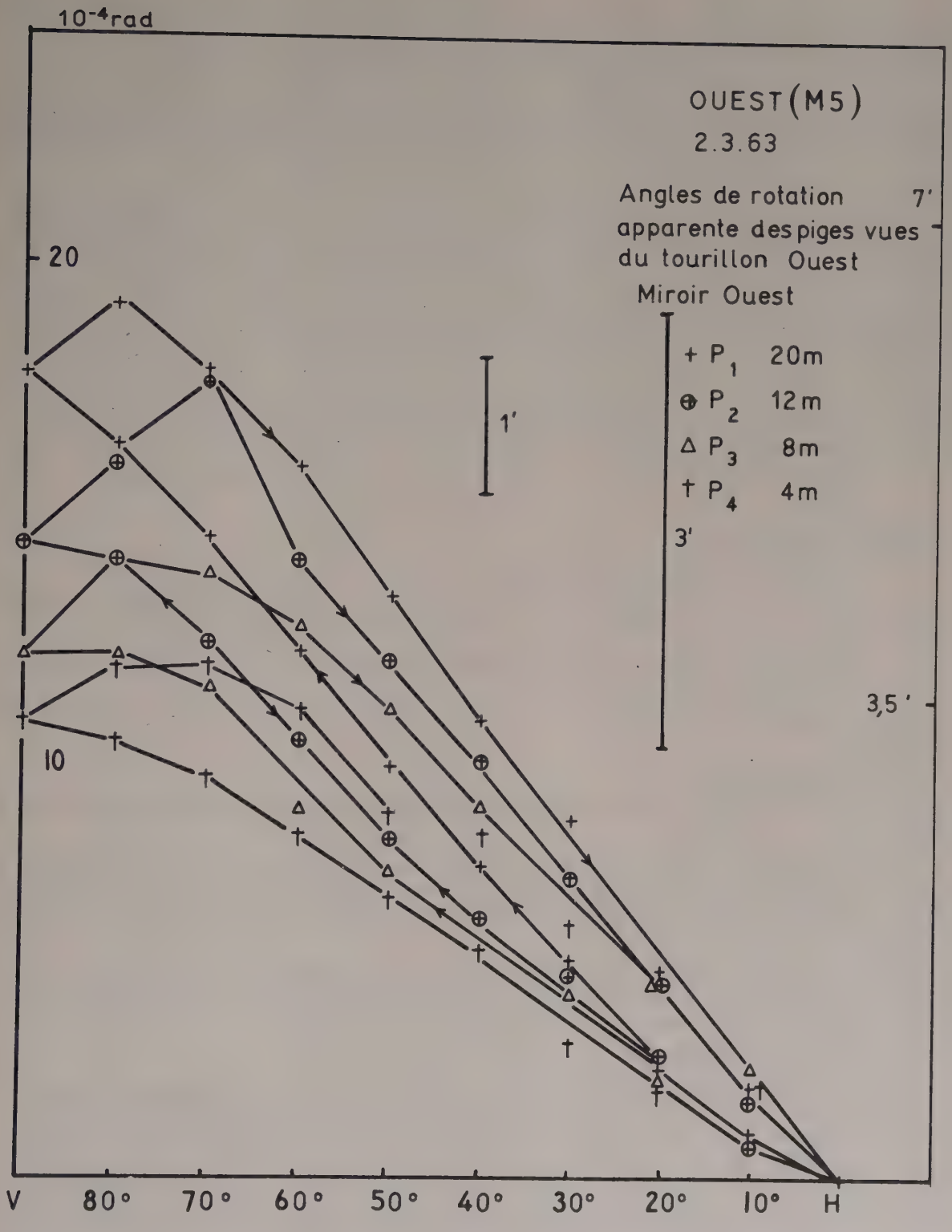


Figure 19 - Rotation apparente de la charpente après renforcement des liaisons.

approximativement horizontal, on a réglé le niveau sur ses vis calantes de façon à ce que son axe de rotation soit vertical et l'axe optique de la lunette perpendiculaire à cet axe, donc horizontal.

Au cours de la rotation du réflecteur, l'axe de visée et l'axe de rotation de la lunette balayent un plan méridien. En admettant que l'axe de rotation fléchisse et que la direction de visée ne fasse plus alors un angle constant avec le support lié au fer de rive, cet effet est certainement très faible et ne peut fausser les résultats comme on le verra plus loin.

Six piges ont été montées, disposées de façon à ne pas se cacher les unes des autres. Elles ont été fixées sur le fer de rive. Chaque pige consiste en 10 cm de règle graduée en cm et mm.

Pour permettre la visée dans toutes les directions du miroir, la lunette a été fixée à peu près à 1 mètre au Nord de l'axe. Les distances des piges ont été mesurées au ruban d'acier.

Pige	N1	N2	N3	S3	S2	S1
Distance miroir 5	1900,6	1106,0	392,7	502,0	1298,8	2093,7
Distance miroir 6	1901,4	1099,5	356,1	486,1	1282,0	2087,0

Dans les deux cas :

N1 et S1 sont au bout du miroir,

N2 et S2 au voisinage des poutres Est-Ouest où se fixe le tambour d'entraînement,

N3 et S3 à 4 mètres du tube central, à l'aplomb d'autres poutres Est-Ouest.

(La lunette employée ne permet pas de viser à moins de 4 mètres environ, ce qui est regrettable).

b) Mode opératoire

Le plan du grillage a été repéré par rapport aux piges par mesure directe à la lunette.

On fait tourner le miroir de 10° en 10° (lecture aux indicateurs de la passerelle) et l'on vise pour chaque inclinaison les six piges. Chaque visée est faite deux fois en retournant la lunette autour de son axe optique entre les deux visées de façon à éliminer l'erreur de collimation.

Pour le miroir 5, les lectures ont été faites en déplaçant les deux panneaux simultanément. Pour le miroir 6, on déplaçait seulement le panneau étudié. Dans les deux cas, les données ont été relevées en se déplaçant vers la verticale, puis vers l'horizontale.

c) Analyse du processus

On mesure la distance de 6 points du miroir situés dans un même plan méridien à la ligne de visée de la lunette. Ces observations ont pour but essentiel de vérifier la planéité du réflecteur radio et, indirectement, de mesurer son inclinaison absolue. Pour ce genre de contrôle, les distances à un plan quelconque sont suffisantes. La ligne de visée n'a pas besoin d'être parallèle au réflecteur pourvu qu'elle ne s'écarte pas trop, ce qui est le cas. Dans ces conditions, on est sûr que les positions relatives des différents segments de droite joignant les points visés du réflecteur radio sont obtenues avec précision.

d) Résultats

Les points mesurés ne s'écartent jamais d'un plan moyen de plus de 5 à 6 mm. La qualité du miroir dans le plan méridien où les mesures ont été faites est donc excellente.

L'hystérésis est encore apparente mais on ne peut pas savoir directement si elle provient du plan réflecteur dans son ensemble ou de la région où est fixé le niveau qui est proche du caisson poutre.

De plus, on constate que pour une inclinaison donnée et pour deux piges situées symétriquement par rapport au caisson, le point d'ordonnée la plus grande ne correspond jamais au même sens de rotation du miroir. Ceci peut s'interpréter par une hystérésis dans l'angle que forme l'axe de rotation de la lunette avec le plan réflecteur. S'il en est ainsi, on doit trouver que, pour une inclinaison donnée, l'hystérésis angulaire doit être constante quand on passe d'une pige à l'autre. Connaissant la distance de la lunette à chacune des piges, on a calculé cet angle. L'hystérésis sur chacune des piges a été prise égale à la moyenne de la différence des lectures faites dans chaque sens de rotation, pour toutes les inclinaisons. Les résultats de ce calcul sont reportés sur la figure 20. On constate que pour les piges les plus éloignées, l'amplitude de l'hystérésis "angulaire" est la même au Nord et au Sud. On peut donc penser qu'il s'agit bien d'une rotation de l'axe de la lunette et du fer qui le porte. Pour les piges N3 et S3, il existe une asymétrie notable.

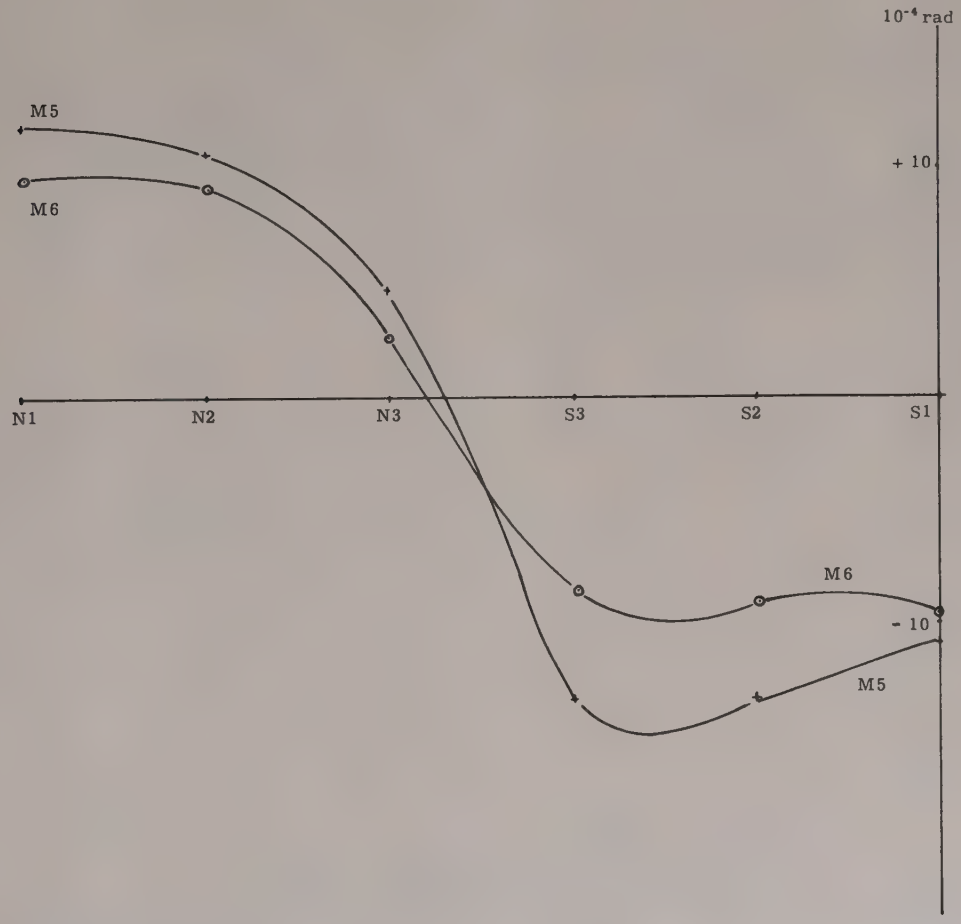


Figure 20 - Déformations du miroir au cours de la rotation. Hystérésis au renversement de marche.

On peut interpréter ces résultats en admettant que l'hystérésis est introduite par la liaison du caisson à la charpente du plan et qu'elle est d'autant plus faible perpendiculairement à ce plan qu'on s'éloigne plus du caisson. Pour les piges les plus éloignées il n'y a probablement pas du tout d'hystérésis locale dans la charpente.

La non linéarité observée provient uniquement de la monture de la lunette. Par contre, pour les piges proches (S3, N3) on a aussi une déformation locale présentant de l'hystérésis. Notons enfin que la méthode de calcul fait intervenir les différences des lectures faites sur une pige donnée selon le sens de rotation. Elle élimine donc les déplacements du support de la lunette parallèlement aux piges, s'ils ne présentent pas de non linéarité notable.

A partir des lectures faites sur les piges, on peut aussi déterminer les mouvements de la lunette perpendiculairement au plan du réflecteur. On verra plus loin que le plan réflecteur radio moyen reste parallèle au plan défini par les points S2 et N2 où s'implante le tambour d'entraînement. C'est donc par rapport au segment S2 N2 que l'on a étudié des mouvements. Si d_n est la distance de la lunette à la pige N2, et d_s à la pige S2, si N2 et S2 sont les lectures faites sur les piges N2 et S2, on voit facilement que le déplacement de la lunette par rapport au segment S2 N2, (ou du segment S2 N2 par rapport à la lunette), est donné par :

$$h = \frac{S2\ d_n + N2\ d_s}{d_n + d_s}$$

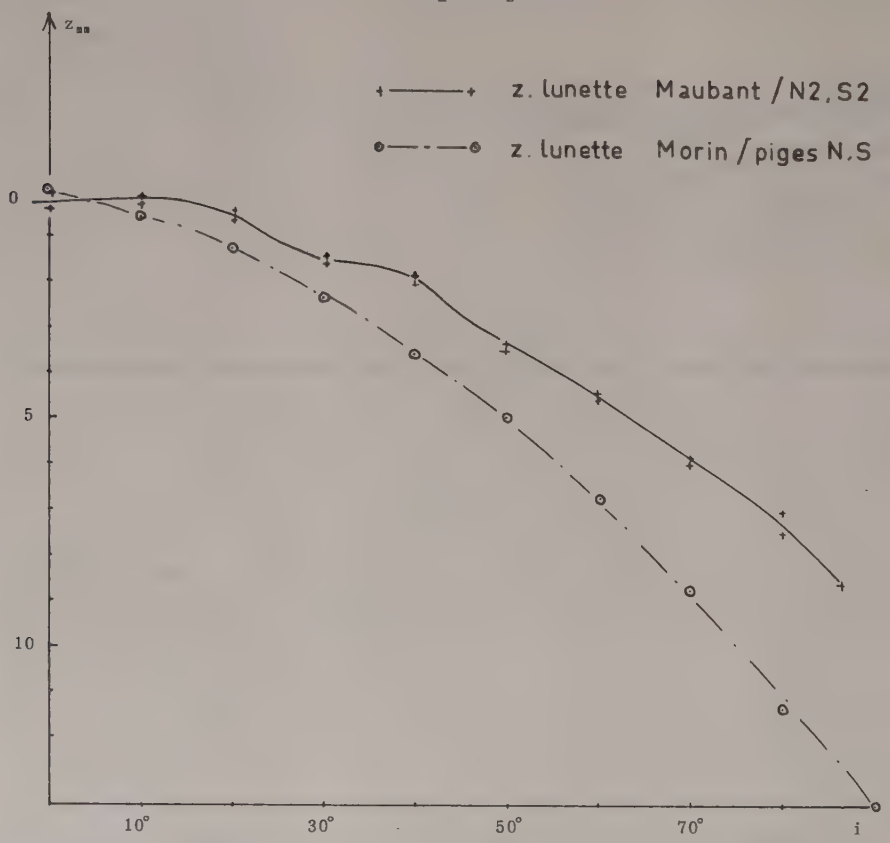


Figure 21 - Variation de la distance "z" entre le plan réflecteur et l'axe de la lunette en fonction de l'inclinaison des miroirs.
(en traits continus niveau MAUBANT)
(en traits mixtes lunettes Morin SECRETAN)

La variation de h avec l'inclinaison est donnée sur la figure 21, h varie de 25 à 33 mm et cette variation ne présente aucune hystérésis notable. Sur le même graphique nous avons porté les mesures de variation de distance entre l'axe optique d'une lunette parallèle au segment joignant les points N2 et S2, fixée au tourillon du miroir et le segment N2 S2 lui-même. On voit que les deux mesures sont en bon accord, les écarts proviennent uniquement des déformations locales du plan au voisinage de la monture du niveau Maubant.

La déformation du miroir présente quelques aspects qualitatifs intéressants. Quand le panneau est horizontal, les points S2 et N2 où s'implante le tambour sont des points bas par rapport aux régions voisines du caisson. Tout se passe comme si le tambour d'entraînement "pendait" sous le miroir. Quand le miroir tourne, les points S2 N2 remontent et tout se passe comme si la tension des câbles supportant le grillage compensait de mieux en mieux l'effort décroissant exercé par le tambour.

Si l'on fait passer une droite au mieux parmi les moins mesurés, on constate que sa pente est voisine de celle des segments S2 N2 et S3 N3. La déformation du plan est donc approximativement symétrique par rapport au caisson dès que la distance à l'axe est assez grande pour rendre négligeable les efforts dus à la rotation du caisson. Ce résultat important est confirmé par les calculs suivants :

3 - Calcul du plan réflecteur effectif :

On s'est proposé de déterminer le plan réflecteur effectif et les angles qu'il forme, au cours de la rotation, avec certains segments liés à la charpente. Comme le réflecteur est excellent, on se trouve dans les conditions où ce calcul est possible.

On a donc cherché à déterminer ce plan effectif par la méthode des moindres carrés, en affectant chacun des éléments de la surface d'un poids proportionnel à la densité de flux que l'on reçoit réellement au foyer après réflexion. On s'est donné une illumination en $\cos^2 x$ tombant à zéro aux bords Nord-Sud du miroir à la verticale. La surface est divisée en six tranches horizontales limitées par les points d'abscisses :

g_3	- 20 m	à	- 16 m	et	+ 20 m	à	+ 16 m
g_2	- 16 m	à	- 8 m	et	+ 16 m	à	+ 8 m
g_1	- 8 m	à	0	et	+ 8 m	à	0

a) Calcul des poids

g_1, g_2, g_3 sont calculés par les formules suivantes :

$$g_1 = \frac{\pi}{10} \cos i + \frac{1}{4} \sin (72°.\cos i)$$

$$g_2 = \frac{\pi}{5} \cos i + \frac{1}{4} \sin (144°.\cos i) - g_1 = \alpha - g_1$$

$$g_3 = \frac{\pi}{4} \cos i + \frac{1}{4} \sin (180°.\cos i) - \alpha$$

déduites de

$$g = \int_{0°}^{36°} \cos^2 x \, dx = \frac{\pi}{10} + \frac{1}{4} \sin 72°$$

Le tableau suivant donne les poids g_1, g_2, g_3 en fonction de i, complément de l'inclinaison.

i	g_1	g_2	g_3
0° (3°)	0,552	0,223	0,011
10°	0,546	0,227	0,015
20°	0,526	0,239	0,021
30°	0,493	0,256	0,033
40°	0,446	0,269	0,054
50°	0,382	0,255	0,090

b) Emploi de la méthode des moindres carrés :

Soient x_i les abscisses, y_i les ordonnées des points mesurés par rapport à un plan quelconque, en l'occurence celui contenant la ligne de visée. On cherche la droite représentée par $y = ax + b$ qui représente le mieux le miroir réel. Les poids correspondant aux x_i sont appelés g_i. La distance entre la droite et le réflecteur est :

$$\varepsilon_i = \sqrt{g_i}\ (y - y_i)$$

L'écart moyen quadratique est :

$$E = \sum \varepsilon_i^2 = \sum g_i (y - y_i)^2 = \sum g_i (ax_i + b - y_i)^2$$

On écrit que

$$\frac{\partial E}{\partial a} = 0 \qquad \frac{\partial E}{\partial b} = 0$$

On a :

$$\frac{1}{2}\frac{\partial E}{\partial a} = a \sum g_i x_i^2 + b \sum g_i x_i - \sum g_i x_i y_i = 0$$

$$\frac{1}{2}\frac{\partial E}{\partial b} = a \sum g_i x_i + b \sum g_i - \sum g_i y_i = 0$$

Comme les x_i sont symétriques par rapport à l'origine et que les g_i ne dépendent que de x_i, on a :

$$\sum g_i x_i = 0$$

D'où les deux équations :

$$a \sum g_i x_i^2 = \sum g_i x_i y_i$$

$$b \sum g_i = \sum g_i y_i$$

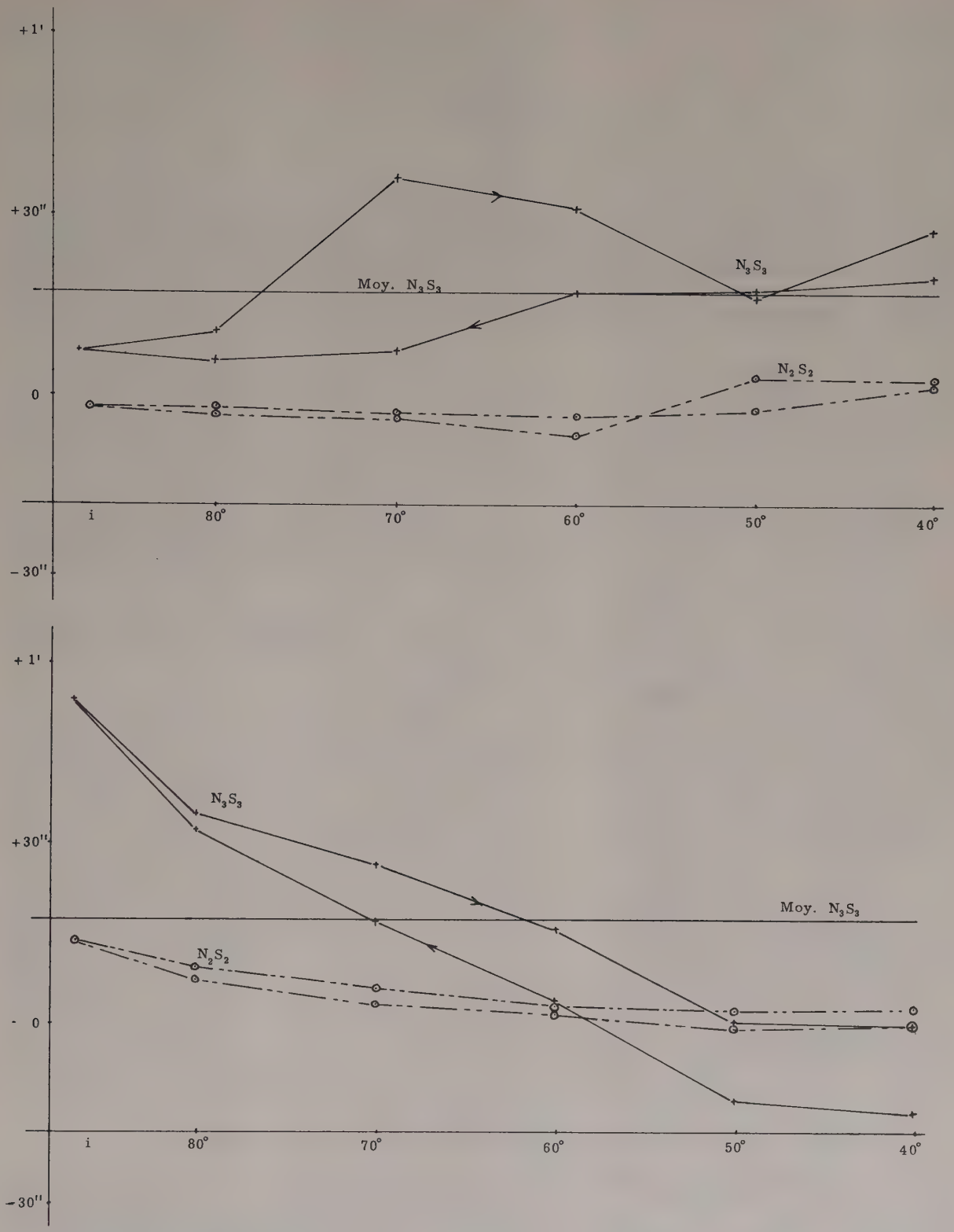


Figure 22 - Déformation du miroir au cours de la rotation : écarts angulaires de certains segments liés à la charpente avec le plan moyen réflecteur - Miroir n° 5. Miroir n° 6.

D'où la pente :

$$a = \frac{\sum g_i \; x_i \; y_i}{\sum g_i \; x_i^2}$$

c) Résultats :

Ils sont reportés sur la figure 22 pour les miroirs. On a porté en ordonnées la différence d'inclinaison entre le plan réflecteur effectif et les segments S2 N2 (tambour d'entraînement) et S3 N3. Les inclinaisons du plan moyen, de S2 N2 et S3 N3 ne sont pas connues en valeur absolue, mais seulement par rapport à la ligne de visée de la lunette dans chaque position du miroir. Mais comme les angles formés par toutes ces directions sont inférieurs au millième de radian, les différences portées en ordonnées sont parfaitement connues.

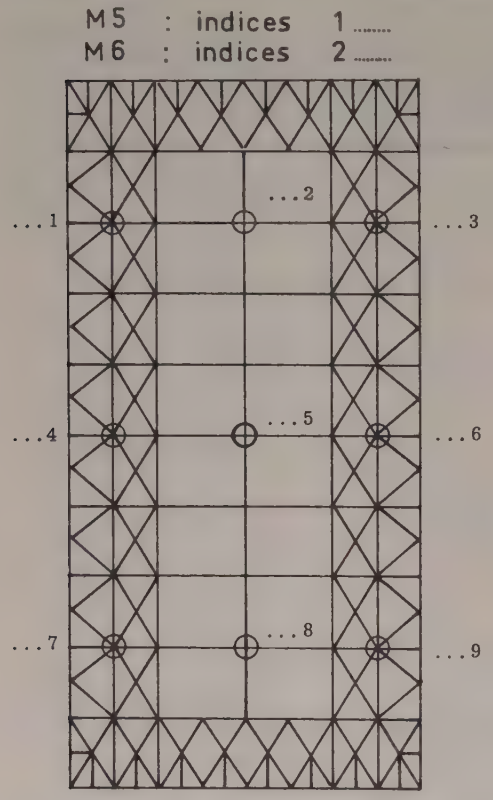


Figure 23 - Répartition des points de contrôle I.G.N. sur le plan réflecteur.

On constate que la liaison de S3 N3 (poutres à 4 mètres de l'axe) et du plan moyen présente de l'hystérésis. Les écarts restent néanmoins constants à ± 20" près pour le panneau 5 et à ± 40" près seulement pour le miroir 6. Il existe dans les deux cas une hystérésis notable.

La liaison de S2 N2 au plan réflecteur effectif est par contre excellente ; l'angle fourni reste constant à ± 6" pour les deux miroirs. L'hystérésis est négligeable.

4 - Contrôle de la planéité du miroir mobile à différentes inclinaisons (par I.G.N., mars 1963)

Il apparait clairement que les mesures faites avec le niveau Maubant ne peuvent être considérées comme parfaitement représentatives des déformations des miroirs, dans la mesure où elles sont faites le long d'un bord du miroir, c'est-à-dire dans la région qui est en porte-à-faux à l'extérieur de la poutre secondaire, ossature du miroir. Nous avons donc décidé de déterminer, par rapport aux coordonnées des points de base ayant servi à l'implantation, les coordonnées x, y, z de 9 points pris sur chacune des miroirs 5 et 6, et d'étudier ces points à quatre inclinaisons différentes (88°3 verticale, 74°, 59°5, 45°). La position des 9 points sur les miroirs 5 et 6 est donnée par la figure 23.

Les mesures ont été effectuées par l'I.G.N. au moyen de théodolites Wild T3 à centrage forcé et les calculs effectués à la calculatrice CAB 500 de l'I.G.N. à Saint-Mandé.

La précision des déterminations planimétriques est 0,2 à 0,3 mm.

La précision des déterminations altimétriques est 0,4 à 0,5 mm.

On a déterminé pour chaque inclinaison, par la méthode des moindres carrés, le plan passant au plus près par les 9 points mesurés (plan pour lequel la somme des carrés des distances par rapport au plan des 9 points est minimum). Est calculée également l'inclinaison d'une "ligne de plus grande pente" de ce plan. Les résultats sont donnés dans le tableau page 175.

Ecarts aux Plans moyens en mm.

Miroir Ouest n° 5

Inclinaison	Points 11	12	13	14	15	16	17	18	19
1° 39' 39"	+0.2	-3.0	-1.6	+4.4	-0.7	+5.0	-0.3	-5.1	+1.1
15° 54' 08"	+0.8	-2.5	-1.3	+2.8	-0.8	+4.0	-0.1	-3.6	+0.7
30° 28' 03"	+0.8	-1.4	-1.0	+1.3	-0.7	+2.6	+0.1	-2.5	+0.8
45° 04' 20"	+1.8	-1.2	-0.8	0.0	-1.2	+1.4	+0.4	-1.9	+1.4

Miroir Est n° 6

Inclinaison	Points 21	22	23	24	25	26	27	28	29
1° 40' 29"	-1.5	-5.4	-1.7	+7.4	+2.7	+7.2	-1.5	-6.0	-1.0
15° 54' 05"	-1.3	-4.4	-1.1	+5.7	+2.2	+5.4	-1.3	-4.2	-1.1
30° 28' 30"	-0.8	-3.2	-1.0	+4.1	+2.3	+3.8	-1.2	-3.1	-0.7
45° 03' 50"	-0.5	-2.8	-0.6	+3.1	+1.8	+2.8	-0.9	-2.6	-0.4

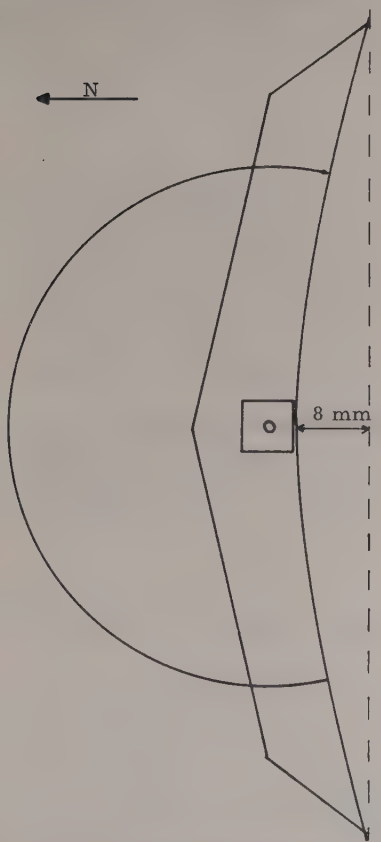


Figure 24 - Déformations au cours de la rotation : sections par un plan vertical.

Si l'on suppose que l'inclinaison est réellement mesurée en considérant le segment de droite qui passe par les points 11 et 17 ou 13 et 19, on peut évaluer l'erreur commise par rapport à l'inclinaison de la ligne de plus grande pente du plan moyen.

On considère la différence des écarts par rapport au plan moyen entre les points au Nord (l_n) et les points au Sud (l_s), soit $l_s - l_n$, à partir de laquelle nous calculons les erreurs commises par rapport à l'inclinaison du plan (l_s et l_n étant positifs pour un point situé au Nord et au-dessous du plan moyen).

On constate donc (page 176) :

- que les segments de droite considérés sont liés au plan réflecteur moyen à 4"4 près au cours de la rotation entre 45° et 88°3, ce qui est tout à fait satisfaisant et corrobore l'étude faite au moyen du niveau Maubant le long d'une ligne de plus grande pente passant par l'extrême bord Est ou Ouest des miroirs.

- que les différents segments de droite ne sont pas parallèles aux plans réflecteurs moyens et que l'erreur maximale commise en définissant le miroir par ce segment de droite peut atteindre 20". On peut toutefois noter que cette erreur est une constante

caractéristique de chaque plan et de chaque segment de droite. Dans la mesure où l'on peut l'atteindre par l'expérience, elle peut être introduite dans l'étalonnage général du pointage.

En ce qui concerne la configuration générale des miroirs au cours de la rotation de l'horizontale à la verticale :

- si l'on considère les sections par un plan méridien vertical, on voit que très sensiblement plan à 45° d'inclinaison, le miroir "se creuse" de plus en plus vers le Nord et se transforme en une portion de cylindre tournant sa concavité vers le Sud (figure 24), l'amplitude de la déformation atteint 8 mm.

- si l'on considère les sections par un plan perpendiculaire au réflecteur et parallèle à l'axe de rotation, on voit que les bords Est et Ouest du miroir reculent vers le Nord par rapport au centre (figure 25). L'amplitude moyenne du phénomène est de l'ordre de 5 mm.

	M5						M6					
Inclinaison	pt. 11	pt. 17	$\Delta i = \frac{l_s - l_n}{2 \times 12}$ 10^{-4} rad	pt. 13	pt. 19	Δi	pt. 21	pt. 27	Δi	pt. 23	pt. 29	Δi
88°3	0.2	-0.3	-0.21	-1.6	+1.1	1.1	-1.5	-1.5	0	-1.7	-1.0	+0.29
74°	0.8		-0.37	-1.3	+0.7	0.83	-1.3	-1.3	0	-1.1	-1.1	0
59°5	0.8	0.1	-0.29	-1.0	0.8	0.75	-0.8	-1.2	-0.17	-1.0	-0.7	+0.12
45°	1.8	0.4	-0.58	-0.8	+1.4	0.92	-0.5	-0.9	-0.17	-0.6	-0.4	+0.08

Ecarts Δi en secondes d'arc

	M5		M6	
Inclinaison	ligne 11-17	ligne 13-19	ligne 21-27	ligne 23-29
83°3	- 4"2	22"	0"	+5"8
74°	- 7"4	16"6	0"	0"
59°5	- 5"8	15"0	-3"4	+2"4
45°	-10"6	18"4	-3"4	+1"6
variation de Δi entre 45° et 88°	- 6"4	-3"6	-3"4	-4"2

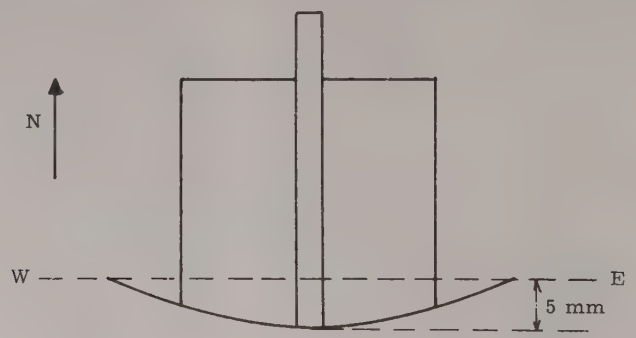


Figure 25 - Déformations au cours de la rotation : section par un plan horizontal.

CONCLUSION

Dans la partie consacrée au miroir sphérique, nous avons vu que la comparaison des paramètres astronomiques de correction caractérisant l'instrument avec les résultats des contrôles d'implantation et de structure fait ressortir la qualité du travail effectué par le constructeur, ainsi que la précision de l'implantation effectuée par l'I.G.N. Ceci a été rendu possible par la recherche par la Section des Travaux Spéciaux de l'I.G.N. de la précision maximale dans les contrôles par microtriangulation. En ce qui concerne la deuxième tranche des travaux de construction, la comparaison des paramètres astronomiques et géodésiques n'a pas encore été faite, en raison des difficultés rencontrées dans la réalisation du système de poursuite par déplacement des antennes focales. Néanmoins, les précautions prises dans l'élaboration de l'infrastructure de l'implantation, c'est-à-dire :

- le nombre considérable et la précision de détermination des points primaires matérialisés sur le terrain, ainsi que la triangulation reliant les bases du miroir sphérique et du miroir plan.

- les interventions répétées de l'I.G.N. et de l'Observatoire au cours de la construction et du réglage font que la qualité des surfaces réfléchissantes devrait être supérieure à celle de la surface construite pendant la première phase des travaux (Rappelons que, pour 56 points répartis sur une portion de 700 m² de la deuxième phase de construction du miroir sphérique, la moyenne des écarts à la sphère théorique est nulle). Toutefois, nous devons remarquer que le problème des déformations thermiques, qui a été seulement abordé, demande une étude complète.

Pour la partie concernant le réflecteur plan, l'étude des miroirs mobiles montre que la structure a été utilisée au maximum de ses possibilités. De même que pour le miroir sphérique, reste à étudier le problème des déformations thermiques qui présente une importance particulière à la longueur d'onde de 6 cm par son retentissement sur le pointage et sur le gain effectif de l'ouverture. Un programme de mesures est actuellement en cours de réalisation.

Nous avons vu que :

- la ligne de plus grande pente joignant les points à 12 mètres au Nord et au Sud de l'axe peut être considérée comme représentative du plan à ± 6'', soit environ à ± 0°002 (pourvu que le décalage permanent qui peut exister entre une ligne de plus grande pente donnée et le plan moyen réflecteur ait été mesuré).

- les déformations propres du plan réflecteur atteignent 6 mm et 8 mm à la position verticale, ce qui représente à la longueur d'onde de 6 cm une déformation égale ou supérieure à $\frac{\lambda}{10}$, qui possède de plus une périodicité à 20 mètres.

Compte tenu du fait que le miroir a été conçu à l'origine pour fonctionner à la longueur d'onde de 21 cm, il importe de noter que les chiffres ci-dessus représentent les performances ultimes de l'instrument et nous pouvons admettre qu'un système digital de mesure de l'inclinaison, lié aux tourillons des miroirs et astreint à suivre le segment de ligne de plus grande pente joignant les points N2 et S2 de la structure, puisse mesurer l'inclinaison du plan avec une erreur moyenne quadratique de ± 0°004 (± 15'').

BIBLIOGRAPHIE

(1) A. BOISCHOT, M. GINAT et M. PARISE - Notes et Informations de l'Observatoire de Paris, fasc. 21, mai 1964.

(2) J. ARSAC - Calcul du Grand Miroir de Nançay (Rapport interne)

(3) F. BIRAUD - Figures de diffraction au foyer du Grand Miroir (rapport interne).

(4) J. RORET - Ann. Inst. Tech. du Bâtiment et des T.P., suppl. au n° 37, janvier 1962.

(5) J. POLOSSAT - D.E.S., Paris 1962.

DEUXIEME THESE

Propositions données par la Faculté

"ETUDE DE LA VITESSE DE ROTATION DES PLANETES DU SYSTEME SOLAIRE PAR LA METHODE DES ECHOS RADAR".

Vu et approuvé :
Paris, le 24 Juin 1966
Le Doyen de la Faculté des Sciences,
Marc. ZAMANSKY

Vu
et Permis d'imprimer :
Le Recteur de l'Académie
de Paris,
Jean ROCHE